

Výroba hmotných odlitků z litiny s kuličkovým grafitem

Diplomová práce

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojírenská technologie a materiály

Autor práce:

Bc. Martin Nosek

Vedoucí práce:

prof. Ing. Iva Nová, CSc.

Zadání diplomové práce

Výroba hmotných odlitků z litiny s kuličkovým grafitem

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Nosek**
Osobní číslo: S17000236
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a materiály
Zadávací katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: **2018/2019**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s grafickými lity, hlavní pozornost věnujte litině s litinou s kuličkovým grafitem, jejím mechanickým a užitným vlastnostem.
2. Prostudujte technologii metalurgické přípravy litiny s kuličkovým grafitem, použití modifikátorů a jejich modifikačních účinků pro odlévání velkého množství taveniny. Současně věnujte pozornost vhodným formovacím a jádrovým směsím pro výrobu forem a jader hmotných odlitků z litiny s kuličkovým grafitem.
3. Prostudujte nejčastější vady odlitků z litiny s kuličkovým grafitem.
4. Na základě vyrobených hmotných odlitků z litiny s kuličkovým grafitem, proveďte vyhodnocení struktury a tvrdosti odlitků. Také se zaměřte na vzniklé vady. Proveďte jejich analýzu, statistické vyhodnocení, případně se pokuste o nápravné opatření.
5. Vyhodnoťte dosažené výsledky a formulujte díčí závěry práce.

Rozsah grafických prací:	tabulky, grafy
Rozsah pracovní zprávy:	50 stran textu
Forma zpracování práce:	tištěná/elektronická



Seznam odborné literatury:

- [1] ROUČKA, J. *Metalurgie litin*. RoPC-DIR s.r.o, Brno, 1998, ISBN 80-214-1263-1.
- [2] ELBEL, T. *Diagnostika a řízení kvality odlitku*. [Skripta – studijní opora]. VŠB-TU Ostrava 2013, ISBN 978-80-248-3356-9.
- [3] VONDRÁK, V. *Sekundární metalurgie litin*. [Skripta]. VŠB – TU Ostrava 2004.
- [4] HRZÁN, M. *Slévárenská technologie litin s kuličkovým grafitem*. Svaz sléváren ČR, 2007.
- [5] OTÁHAL, V. *Tvárná litina – Litina s kuličkovým grafitem* [Monografie]. 2. rozšířené vydání. Technicko-ekonomické poradenství Brno.
- [6] HAMPL, J. *Metalurgie slévárenských slitin*. [Skripta – studijní opora]. VŠB-TU Ostrava 2013.
- [7] Iron Casting Handbook, Iron Casting Soc., Inc. 1981.
- [8] Ductile Iron Handbook, AFS, Des Plaines, USA, 1993.

Vedoucí práce: prof. Ing. Iva Nová, CSc.
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce: 31. října 2018

Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2020

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

V Liberci 1. listopadu 2018



doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

11. června 2020

Bc. Martin Nosek

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá výrobou hmotných odlitků z litiny s kuličkovým grafitem a nejčastějšími vadami, které se u daných odlitků vyskytují. Teoretická část je zaměřena na základní rozdělení litin, tvar grafitu, teorie vzniku kuličkového grafitu, mechanické a užitné vlastnosti litin s kuličkovým grafitem, ale také na vlastní výrobu, tepelné zpracování a nejčastější vady, které se obecně vyskytují na litinových odlitcích. Praktická část je zaměřena na porovnání chem. složení, mech. hodnot a metalografických výbrusů testovaných vzorků. Identifikaci vad a určení příčiny jejich vzniku a statistické vyhodnocení jejich výskytu u hmotných odlitků.

Klíčová slova

Litina s kuličkovým grafitem, výroba litiny s kuličkovým grafitem, vady odlitků

Abstract

This diploma thesis deals with the production of material castings from cast iron with spheroidal graphite and the most common defects that occur in the castings. The theoretical part is focused on the basic division of cast irons, the shape of graphite, the theory of spheroidal graphite formation, mechanical and utility properties of spheroidal graphite cast irons, but also on own production, heat treatment and the most common defects that generally occur on cast iron castings. The practical part is focused on the comparison of chemical composition, mechanical values and metallographic sections of tested samples. Identification of defects and determination of the cause of their occurrence and statistical evaluation of their occurrence in castings.

Keywords

Cast iron with spheroidal graphite, production of cast iron with spheroidal graphite, defects in castings

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce prof. Ing. Ivě Nové, CSc. za odborné vedení a ochotu při tvorbě této práce.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině za trpělivost a podporu nejen při tvorbě této práce, ale i po celou dobu studia.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	10
Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	13
1 ÚVOD	14
2 TEORETICKÁ ČÁST	15
2.1 Základní klasifikace litin	15
2.1.1 Bílé litiny	15
2.1.2 Grafické litiny	16
2.2 Rozdělení grafických litin dle tvaru grafitu	16
2.3 Krystalizace litin s kuličkovým grafitem	17
2.3.1 Teorie vzniku kuličkového grafitu	18
2.3.2 Chemické složení litin s kuličkovým grafitem a vliv prvků	19
2.4 Značení litin s kuličkovým grafitem dle ČSN EN 1560	22
2.5 Mechanické a fyzikální vlastnosti litin s kuličkovým grafitem	23
2.5.1 Mechanické vlastnosti	23
2.5.2 Fyzikální vlastnosti	24
2.6 Tepelné zpracování litin s kuličkovým grafitem	25
2.6.1 Kalení a popuštění	25
2.6.2 Izotermické kalení	26
2.6.3 Žihání na odstranění vnitřního pnutí	27
2.6.4 Žihání na měkko	27
2.7 Modifikace litiny s kuličkovým grafitem	28
2.7.1 Podstata modifikace	28
2.7.2 Fyzikální a chemické vlastnosti hořčíku	29
2.7.3 Modifikace předslitinami s křemíkem	29
2.7.4 Modifikace předslitinami s niklem	30
2.7.5 Modifikace kovovým hořčíkem	30
2.7.6 Dávkování modifikátoru	30
2.7.7 Ztráty hořčíku po modifikaci	31
2.7.8 Doba odeznívání modifikačního účinku	32
2.8 Očkování	32
2.9 Metody modifikace litin s kuličkovým grafitem	33
2.9.1 Metoda plněných profilů	34

2.9.2	Metoda polévací	35
2.9.3	Metoda modifikace pomocí konvertoru +GF+.....	35
2.9.4	Kontinuální metody	36
2.9.5	Ponořovací metody	37
2.10	Tavící zařízení vhodné pro výrobu litiny s kuličkovým grafitem	38
2.10.1	Vsázkové suroviny	38
2.10.2	Výroba taveniny pro LKG	39
2.11	Formovací a jádrové směsi vhodné pro výrobu hmotných odlitků z LKG ..	42
2.11.1	Furanová pojiva	42
2.11.2	Samotvrdnoucí furanové směsi	43
2.11.3	Chromitová ostřiva a směsi	44
2.12	Nejčastější vady odlitků z LKG	44
2.12.1	Bubliny 410	44
2.12.2	Staženiny 440	45
2.12.3	Zadrogeniny 521	46
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	48
3.1	Výroba hmotných odlitků	48
3.2	Popis zařízení pro chemickou analýzu vzorků	50
3.2.1	Jiskrový optický spektrometr SPECTROMAXx	51
3.2.2	Spalovací elementární analyzátor LECO	51
3.2.3	Chemické složení taveniny v peci a v lící pánvi po modifikaci	52
3.3	Popis zařízení pro mechanické zkoušky	52
3.3.1	Zkouška tahem	52
3.3.2	Nárazová práce	53
3.3.3	Zkouška tvrdosti	53
3.3.4	Vzorky pro mechanické zkoušky	53
3.3.5	Vyhodnocení statické zkoušky tahem	54
3.3.6	Vyhodnocení zkoušky rázem v ohybu	55
3.3.7	Vyhodnocení tvrdosti	56
3.4	Metalografická analýza	56
3.4.1	Příprava vzorků na vyhodnocení	56
3.4.2	Vyhodnocení vzorků	57
3.4.3	Metodika vyhodnocení	57
3.4.4	Vyhodnocení metalografických struktur vzorků	57
3.5	Statistické vyhodnocení a analýza vad na odlitcích těžších než 750 kg	62



3.5.1	Metodika výběru dat	63
3.5.2	Přehled nejčastěji vyskytujících se vad	63
4	SHRNUTÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ	65
5	ZÁVĚR	68
6	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	70

Seznam použitých zkratk a symbolů

°C		Stupeň Celsia
A	[%]	Tažnost
ASTM		Americká asociace pro testování a materiály
C _E		Uhlíkový ekvivalent
ČSN		Česká státní norma
DIN		Německá státní norma
EN		Evropská norma
GJL		Litina s lupínkovým grafitem, značení dle ČSN EN 1560
GJM		Temperovaná litina, značení dle ČSN EN 1560
GJMB		Temperovaná litina s černým lomem, značení dle ČSN EN 1560
GJMW		Temperovaná litina s bílým lomem, značení dle ČSN EN 1560
GJS		Litina s kuličkovým grafitem, značení dle ČSN EN 1560
GJV		Litina s červíčkovým grafitem, značení dle ČSN EN 1560
HBW		Tvrдость dle Brinella
HRC		Tvrдость dle Rockwella
ISO		Mezinárodní norma
KVZ		Kovy vzácných zemin
LKG		Litina s kuličkovým grafitem
LLG		Litina s lupínkovým grafitem
pH		Vodíkový exponent
R _m	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
R _{p0,2}	[MPa]	Smluvní mez kluzu
λ	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Tepelná vodivost
ρ	[kg.m ⁻³]	Hustota

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Stabilní a metastabilní diagram. [1]	15
Obrázek 2 – Tvary grafitu a) lupínkový b) kuličkový c) vermikulární d) vločkový [1]	17
Obrázek 3 – Kuličkový grafit, zvětšeno 100x, leptáno Nital	18
Obrázek 4 - Schéma části rovnovážného diagramu Fe-C-Si s naznačením pro vysvětlení difúze uhlíku z taveniny ke grafitu přes austenit pomocí koncentračního spádu uhlíku v austenitické obálce [4]	19
Obrázek 5 – Hendersonův diagram vlivu S a Si na LKG [8]	20
Obrázek 6 - Vliv křemíku na nárazovou práci [5]	24
Obrázek 7 – ARA diagram nelegované LKG [1]	25
Obrázek 8 – Schéma výroby ADI litiny. Izotermické kalení [1]	26
Obrázek 9 – Žhánění na odstranění vnitřního pnutí [1]	27
Obrázek 10 – Dvoustupňové feritizační žhánění LKG [1]	28
Obrázek 11 – Stanovení maximální doby lití [1]	32
Obrázek 12 – Schéma modifikace LKG pomocí modifikačního drátu [7]	34
Obrázek 13 – Schéma metody Sandwich (vlevo) a metody Tundish-Cover (vpravo) [7]	35
Obrázek 14 – Schéma metody Sandwich (vlevo) a metody Tundish-Cover (vpravo) [7]	36
Obrázek 15 – Vtoková soustava pro metodu In Mold [4]	37
Obrázek 16 – Schéma Podtlakové metody modifikace vlevo, atmosférické vpravo [7]	38
Obrázek 17 – Ocelový odpad (nahore) a vratný materiál (dole)	39
Obrázek 18 – Schéma konstrukce a uspořádání indukčních pecí [1]	41
Obrázek 19 - Mísič pro přípravu furanové směsi	43
Obrázek 20 – Bublina v opracované ploše na odlitku z GJS-400-15	45
Obrázek 21 – Řediny na přírubě čerpadlového tělesa z materiálu GJS-400-15	46
Obrázek 22 – Zadrobenina v opracované technologické ploše stojanové vrtačky	47
Obrázek 23 – OES analyzátor SPECTROMAXx (nahore), zkušební vzorky na chem. analýzu (dole)	51
Obrázek 24 – Zkušební zařízení pro tahovou zkoušku (vlevo) a Charpyho kladivo vpravo	53

Obrázek 25 – Y blok (nahore) a vzorky na zkoušku rázem v ohybu umístěné v mrazicím boxu (dole)	54
Obrázek 26 – Rozměry a tvar zkušební tyče pro zkoušku tahem [norma tah].....	54
Obrázek 27 – Dvoukotoučová bruska Herzog HT350-2	57
Obrázek 28 – Vzorek z odlitku 1 (VO1), zvětšeno 100x, leptáno 4% Nital.....	58
Obrázek 29 – Vzorek ze zkušební tyče (ZT1) odlitku 1, zvětšeno 100x, leptáno 4 % Nital.....	59
Obrázek 30 – Vzorek z Y bloku (VY1) odlitku 1, zvětšeno 100x, leptáno 4 % Nital.....	59
Obrázek 31 – Vzorek z odlitku 2 (VO2), červeně vyznačeny feritické dvorce, zvětšeno 100x, leptáno 4 % Nital	60
Obrázek 32 – Vzorek ze zkušební tyče (ZT2), zvětšeno 100x, leptáno 4 % Nital.....	60
Obrázek 33 – Vzorek z Y bloku (VY2), zvětšeno 100x, leptáno 4 % Nital	61
Obrázek 34 – Vzorek z odlitku 3 (VO3), zvětšeno 100x. leptáno 4 % Nital.....	61
Obrázek 35 – Vzorek ze zkušební tyče (VT3), červeně rozpadnutý grafit, zvětšeno 100x, leptáno 4 % Nital.....	62
Obrázek 36 – Vzorek z Y bloku (VY3), zvětšeno 100x, leptáno 4 % Nital	62

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Mechanické hodnoty vybraných LKG, vlastní úprava [6]	23
Tabulka 2 – Přehled složení vybraných modifikátorů FeSiMg od fy. Snam Aloys PVT [7].....	29
Tabulka 3 – Přehled vybraných očkovačů [10]	33
Tabulka 4 – Chemické složení v peci a lící pánvi pro odlitek č. 1	52
Tabulka 5 – Chemické složení v peci a lící pánvi pro odlitek č. 2	52
Tabulka 6 – Chemické složení v peci a lící pánvi pro odlitek č. 3	52
Tabulka 7 – Výsledky statických zkoušek tahem.....	55
Tabulka 8 – Výsledky pro zkoušku rázem v ohybu	55
Tabulka 9 – Naměřené hodnoty tvrdostí.....	56
Tabulka 10 – Vyhodnocení metalografických vzorků.....	57
Tabulka 11 – přehled nejčastěji vyskytujících se vad u odlitků z hmotností nad 750 kg z LKG.....	63
Tabulka 12 – Procentuální zastoupení nejčastějších vad	66

1 ÚVOD

Historie slévárenství se spojuje již se starověkými kulturami, které se nacházely v oblastech Persie, Egypta či Číny. Z počátku se sléváním vyráběli šperky, postupným vývojem i zbraně a jednoduché pracovní nástroje. V období průmyslové revoluce v 18. a 19. století došlo k masivnímu rozšíření odlévání ocelí a litin pro široké spektrum aplikací. Ve 20. století dal pokrok ve výzkumu a vývoji materiálů za vznik litině s kuličkovým grafitem, vysokopevnostním ocelím, ale také odlévání neželezných kovů, zejména slitinám na bázi hliníku.

Litina s kuličkovým grafitem je materiál, který je široce využíván v mnoha odvětvích průmyslu pro svoje univerzální vlastnosti (kovoobráběcí stroje, čerpadla, armatury, kompresory, převodovky, lodní průmysl, automotive, hutní průmysl, zemědělství aj.). Oproti oceli nabízí lepší, technologicky přívětivější možnosti výroby a oproti litině s lupínkovým grafitem nabízí větší rozsah výhodných mechanických vlastností, a to zejména tažnosti, která může dosáhnout i více než 22 %. Důležitým kritériem při konstrukci nového odlitku je mimo jeho užitných vlastností i cena. Litina s kuličkovým grafitem se z tohoto pohledu nachází mezi velmi nákladným ocelovým odlitkem a levným odlitkem z litiny s lupínkovým grafitem.

Hlavním cílem této diplomové práce je analýza výroby hmotných odlitků z litiny s kuličkovým grafitem.

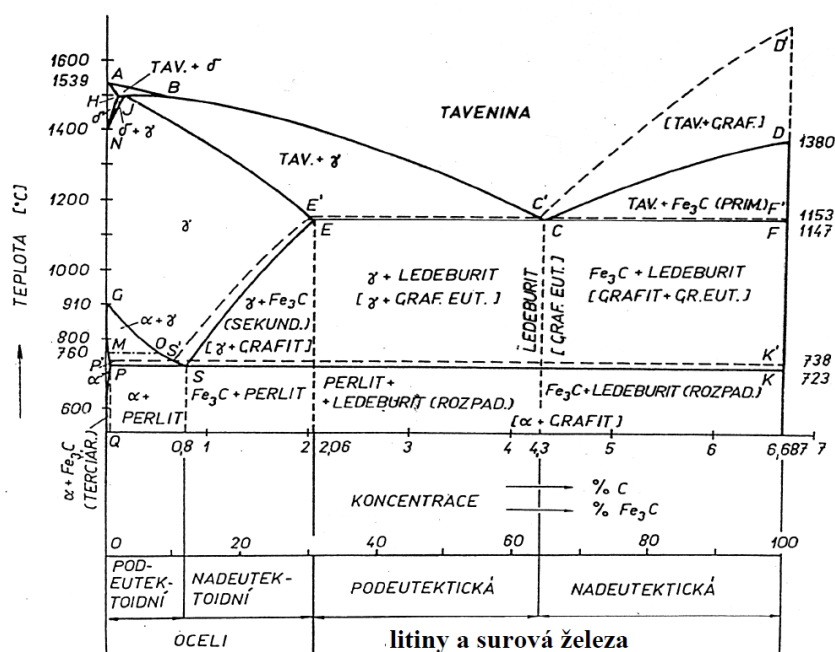
Teoretická část je věnována obecnému přehledu litin s hlavním zaměřením na litinu s kuličkovým grafitem, její druhy, užité a mechanické vlastnosti, výrobu, možnosti modifikace a očkování, tavení, případné následné tepelné zpracování a na formovací směsi, které se používají pro rozměrově velké a hmotné odlitky. Také jsou zmíněny nejčastěji vyskytující se vady u odlitků vyráběných z litin.

Praktická část práce se zabývá porovnáním metalografických a mechanických vzorků ze třech identických odlitků odlévaných z jiných taveb s mírně rozdílným chemickým složením. Dále je provedena analýza vad a jejich statistické vyhodnocení z pohledu zastoupení u odlitků z litiny s kuličkovým grafitem a hmotností vyšší než 750 kg. V závěru diplomové práce jsou získané výsledky a poznatky shrnuty a vyhodnoceny.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Základní klasifikace litin

Litiny jsou slitinami železa, uhlíku, křemíku, manganu a dalších doprovodných prvků jako jsou síra či fosfor, kde obsah uhlíku je vyšší než 2,11 %, tzn. za hranicí maximální rozpustnosti uhlíku v austenitu. Uhlík může být v litinách vyloučen ve formě grafitu nebo jako karbid Fe_3C . Podle toho se také litiny obecně dělí na litiny grafitické a litiny bílé. U grafitických litin je ve struktuře základní kovové hmoty vyloučen grafit. Tvar grafitu může být lupínkový, červíkovitý a globulární. Bílé litiny mají ve struktuře ledeburit, resp. ledeburitický cementit a perlitický cementit. Podle toho krystalizace litin probíhá buď podle stabilního, nebo metastabilního diagramu Fe – C. Oba typy těchto diagramů jsou uvedeny na Obr. 1. [1]



Obrázek 1 – Stabilní a metastabilní diagram. [1]

2.1.1 Bílé litiny

Bílé litiny obsahují ve své struktuře cementit, proto jsou také někdy nazývány karbidické litiny. Uhlík je vázán v cementitu. Základní matrice a cementit ovlivňují výsledné vlastnosti litiny. Bílá litina je velmi tvrdá, křehká a má špatnou obrobiteľnosť. V súčasnej dobe jsou výjimečně vyráběny odlitky pro účely vysoké tvrdosti, častěji jako predstupeň tepelného zpracování a následný vznik litiny temperované. Bílá litina tuhne podle metastabilního systému a eutektikem je ledeburit, resp. ledeburit transformovaný (ledeburit rozpadový).

Temperované litiny jsou houževnaté a snadno obrobitelné. Tepelným zpracováním – temperováním, dochází k rozpadu cementitu a soustava se přetváří z metastabilní na soustavu stabilní. Temperované litiny se dále dělí na litiny s bílým lomem, černým lomem a na litiny perlitické. [1]

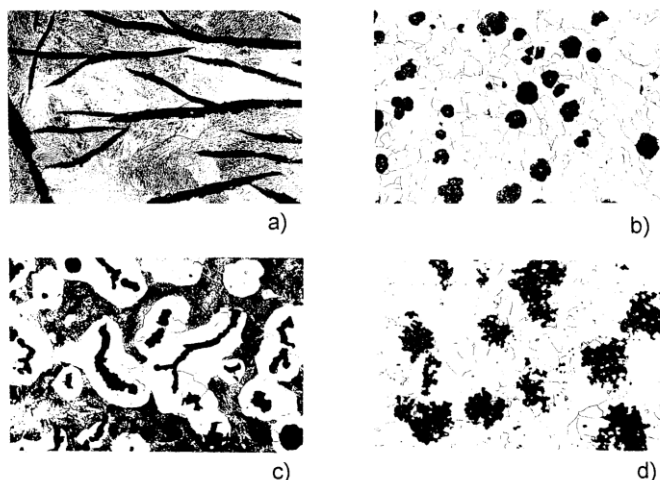
2.1.2 Grafitické litiny

Struktura grafitických litin je tvořena primární fází a eutektikem. Pokud tavenina tuhne dle stabilního systému, vzniká grafitické eutektikum, které je tvořeno austenitem a uhlíkem, který je vyloučený v některé z forem grafitu.

2.2 Rozdělení grafitických litin dle tvaru grafitu

Tvar vyloučeného grafitu je základním rozpoznávacím hlediskem pro rozdělení grafitických litin. Názvy litin, resp. jejich značení je udáváno normou ČSN EN 1560. Rozdělení litin dle tvaru vyloučeného grafitu je následující [1]:

- GJL – litina s lupínkovým grafitem – nejčastěji vyráběná litina, grafit je vyloučen do prostorových útvarů, které se na metalografickém výbrusu zobrazí jako lupínky. Oblast připadající na jeden prostorový útvar grafitu se nazývá eutektická buňka.
- GJV – litina s červíčkovým grafitem – grafit připomíná lupínky, ale na rozdíl od litiny s lupínkovým grafitem jsou jeho útvary tlustší, kratší a jsou zaoblené. Litina s červíčkovým grafitem také vždy obsahuje malé množství kuličkového nebo lupínkového grafitu.
- GJM – litina temperovaná – tuhne dle metastabilního systému a grafit ve formě vloček se v litině vytvoří až následujícím tepelným zpracováním, a to rozpadem cementitu. Tepelný proces se nazývá temperování. Temperovaná litina se dále dělí na litinu s bílým lomem a černým lomem, GJMW resp. GJMB.
- GJS – litina s kuličkovým grafitem – grafit ve formě kuliček. Oblast, která připadá na jednu kuličku grafitu, se nazývá eutektická buňka.

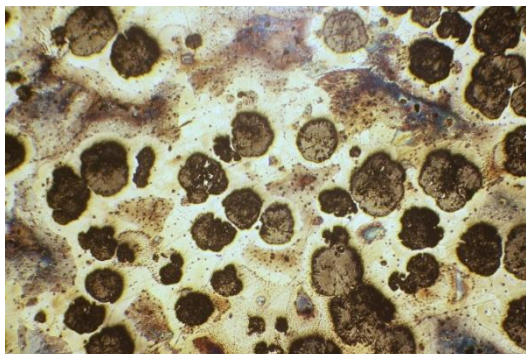


Obrázek 2 – Tvary grafitu a) lupínkový b) kuličkový c) vermikulární d) vločkový [1]

2.3 Krystalizace litin s kuličkovým grafitem

Vznik kuličkovitého grafitu, viz obr. 3, lze při tuhnutí litiny s kuličkovým grafitem považovat za zvláštní případ tuhnutí grafitického eutektika, který je dán změnou fyzikálně-chemického stavu taveniny ve srovnání se stavem, při kterém se vylučuje z taveniny lupínkový grafit. Grafit obecně krystalizuje v šesterečné krystalické soustavě a jeho elementární buňka je charakteristická značným poměrem délek os $c:a$. Při krystalizaci lupínkového grafitu však převládá růst v základní rovině buňky (tj. ve směru osy a) a ve směru výšky šestihranu (tj. ve směru osy c) je růst pomalejší. Má-li se grafit při krystalizaci vylučovat ve tvaru více či méně dokonalých kulovitých zrn, musí být podmínky krystalizace takové, aby došlo ke zpomalení růstu grafitu ve směru podélné osy (a) a ke zrychlení růstu ve směru osy (c). Musí se proto upravit poměr rychlostí růstu grafitu v obou osách.

Kuličkový grafit oproti lupínkovitému omezuje intenzitu vrubového účinku a přispívá k vyšší pevnosti na rozhraní grafit - matrice. Z tohoto důvodu se LLG vyznačuje horšími mechanickými vlastnostmi než LKG při srovnatelném charakteru základní kovové hmoty.



Obrázek 3 – Kuličkový grafit, zvětšeno 100x, leptáno Nital

Proces, který způsobuje vylučování grafitu ve formě kuliček, se nazývá modifikace. K jejímu vzniku přispívá modifikační činidlo, resp. modifikátor (povrchově aktivní látka), kterým je hořčík nebo cín. Použije-li se hořčík, je nutné, aby tavenina obsahovala cca 3,8 až 4,0 % uhlíku a velmi nízký obsah síry do 0,02 %. Mechanismus vzniku tohoto grafitu není doposud jednoznačně vysvětlen a existuje celá řada teorií objasňující tento problém.

Často se předpokládá spirálovitý růst grafitu na základě sbalování lamel rostoucích ve směru „a“. Např. Minkoff [2] a jiní autoři předpokládají, že na mezifázovém rozhraní se koncentrují modifikační prvky (hořčík a cín) a upřednostňují růst grafitu ve směru „c“. Dále je pravděpodobné, že se při vzniku zrna grafitu uplatňuje i vliv oxidů, např. jiných sloučenin hořčíku, které vznikají v tavenině a působí jako krystalizační zárodky grafitu. Při eutektické krystalizaci kuličkovitého grafitu se vylučuje vznikající austenit na zrnech grafitu jako obálka a izoluje ho od taveniny. Proto růst zrn globulárního grafitu probíhá pomaleji než růst lupínků.

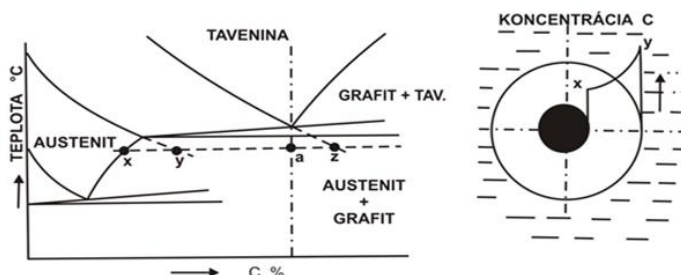
2.3.1 Teorie vzniku kuličkového grafitu

Otázka vzniku zrnitého grafitu je v současné době předmětem výzkumu. V současné době jsou prověřovány některé hypotézy, které hovoří o vzniku kuličkového grafitu [2].

1. hypotéza obalu austenitu - částice grafitu obrůstají kompaktním obalem austenitu a rostou bez styku s taveninou. Současně s růstem grafitu roste i austenitický obal a eutektická přeměna končí úplným rozpadem taveniny na směs austenitu se zrnitým grafitem. Příčina difúze uhlíku z taveniny ke grafitu přes austenit se dá spatřovat v koncentračním spádu uhlíku v austenitické obálce. Venkovní okraj obálky, který je ve styku s taveninou, má vyšší obsah uhlíku, který odpovídá diagramu Fe-C, viz obr. 4. Vnitřní okraje budou mít nižší obsah uhlíku, odpovídající bodu x, tj. rovnováze austenitu s grafitem. V

důsledku tohoto koncentračního spádu x-y probíhá difúze atomů uhlíku austenitu a krystalizace grafitu tak dlouho, než ztuhne všechna tavenina. Rychlost růstu a tvar grafitu není podmíněný rychlostí difúze uhlíku, ale odvodem atomů železa z prostoru, kde se vylučuje grafit. Odvod atomů železa se uskutečňuje samodifúzí pomocí vakantních míst.

2. hypotéza na základě zárodků – vysvětluje tvorbu kuličkového grafitu grafitovým rozvětvením, resp. povrchovou energií. Tato hypotéza vychází z toho, že určitý typ cizích částic (vázaných především s globulizačními prvky) působí jako zárodky pro růst grafitu stejnou rychlostí ve všech směrech. Tak se zabezpečuje tvorba globulitů. Hlavním nedostatkem této hypotézy jsou metalografické důkazy, neboť tato teorie neumí vysvětlit polykrystalickou strukturu grafitu.
3. hypotéza na základě rozvětvených dendritů - předpokládá se, růst grafitových sferolitů. Když je rozvětvení malé, vytváří se lamelární grafit. Když je početnost rozvětvení v důsledku přítomnosti globulizačních prvků velká, vytváří se kuličkový grafit. Ani tato hypotéza není schopná vysvětlit polykrystalickou strukturu lamelárního grafitu.
4. hypotéza bublinové teorie – vysvětluje polykrystalickou stavbu grafitu, ale má málo stoupenců. Teorie je založena na přítomnosti bublinek, které vznikají při reakci $\text{SiO}_2 + 2\text{C} \Rightarrow \text{Si} + 2\text{CO}$. Na vnitřním povrchu těchto bublin krystalizuje grafit ve formě tenkých obálek.



Obrázek 4 - Schéma části rovnovážného diagramu Fe-C-Si s naznačením pro vysvětlení difúze uhlíku z taveniny ke grafitu přes austenit pomocí koncentračního spádu uhlíku v austenitické obálce [4]

2.3.2 Chemické složení litin s kuličkovým grafitem a vliv prvků

Základní prvky, které jsou obsaženy ve větší míře v každé litině, jsou C, Si, P, S a Mn. Jejich vzájemné poměry a množství jsou rozhodné pro výsledné vlastnosti

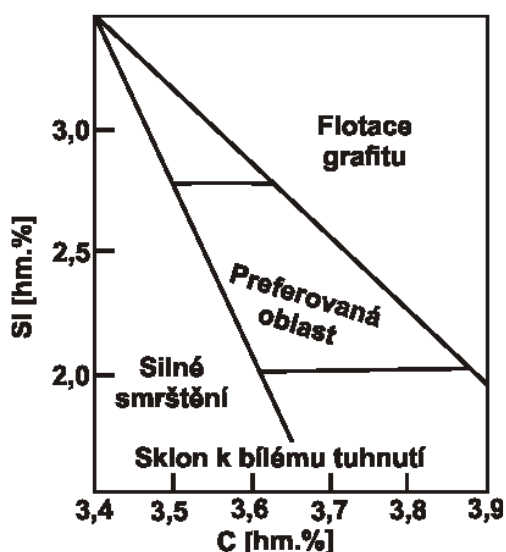
litiny. U litiny s LKG je dále podstatný obsah Mg. Každý prvek má určitý vliv na výsledné fyzikální a mechanické vlastnosti. Prvky klasifikujeme dle jejich vlivu na mikrostrukturu [3]:

- primární prvky – C, Si, P, S a Mn;
- sferoidizační (modifikační) – Mg;
- legující prvky – Ni, Mo a Cu;
- zbytkové prvky – As, Pb, Bi atd.;
- perlito a karbidotvorné prvky – Sn, V, B;
- plyny – H, N a O.

2.3.2.1 Vliv hlavních prvků C a Si v litině s kuličkovým grafitem

Uhlík a křemík jsou grafitotvorné prvky, proto výrazně podporují strukturu prostou karbidů. Oba prvky ovlivňují množství vyloučeného grafitu ve formě kuliček. Ovlivňují tvrdost a následné tepelné zpracování.

Vliv obsahu uhlíku a síry na litinu s kuličkovým grafitem zobrazuje Hendersonův diagram, viz Obr. 5. Při tuhnutí LKG je tvorba grafitu doprovázena objemovými změnami. Při klesajícím uhlíku a křemíku se zvětšuje smrštění. Nízký obsah křemíku podporuje vznik karbidů (litina může mít sklon tuhnout „bíle“). Vysoký obsah uhlíku v kombinaci s nízkým obsahem křemíku a pomalým ochlazováním může vést k degeneraci a floktaci grafitu. [9] Negativní vlastností křemíku je, že u feritických LKG zvyšuje tranzitní teplotu a tím podporuje dřívější vznik křehkého lomu. [1]



Obrázek 5 – Hendersonův diagram vlivu S a Si na LKG [8]

Prvky obsažené v litině ovlivňují aktivitu uhlíku v tuhém roztoku železa a ovlivňují také hodnoty eutektické koncentrace uhlíku. Vliv C, Si a P určuje uhlíkový ekvivalent, který je označován C_E . Rovnice pro výpočet uhlíkového ekvivalentu je:

$$C_E = C + 1/3 (Si + P)$$

Jak je obecně známo, že dle uhlíkového ekvivalentu rozdělujeme grafitické litiny na:

$C_E > 4,25$ – litiny nadetektické;

$C_E = 4,25$ – litiny eutektické;

$C_E < 4,25$ – litiny podeutetické. [1]

2.3.2.2 Vliv fosforu

Fosfor velmi mírně podporuje grafitizaci. Pokud je v litině s kuličkovým grafitem obsažen do 0,5 %, zvyšuje tvrdost, otěruvzdornost a pevnost. Při hodnotách nad 0,5 % pevnost snižuje. Během tuhnutí taveniny fosfor segreguje do zbylé taveniny a na hranicích zrn tvoří fosfidické síťové Fosfidické síťové snižuje dynamické vlastnosti litiny a tedy zvyšuje její křehkost. [1]

2.3.2.3 Vliv manganu

Mangan minimálně ovlivňuje grafitizaci. Při obsahu nad 1 % může podporovat vznik přechlazeného grafitu. V tlustých stěnách odlitku s pomalým ochlazováním, může dojít k segregaci manganu do zbylé taveniny a tím se mohou tvořit karbidy. Mangan má významný vliv na stabilizaci perlitu u litin s kuličkovým grafitem. Perlit zjemňuje, zvyšuje tvrdost, pevnost a otěruvzdornost litiny. [1]

2.3.2.4 Vliv síry

Nejen v litinách s kuličkovým grafitem je síra nežádoucí prvek. Síra se do litiny dostává ve vsázkových surovinách, v nauhličovadlech a při výrobě litiny v kuplovnách z koksu. Síra má sklon k segregaci a tvoří FeS. Pokud není vázána jako sirník manganu, omezuje grafitizaci a zvyšuje křehkost litiny. U litiny s kuličkovým grafitem je obsah síry v tavenině před modifikací doporučován maximálně do 0,02 %. [5]

2.3.2.5 Vliv mědi

Měď je mírně grafitizační prvek. Pokud je v litině s kuličkovým grafitem obsažen v množství od 0,5 do 1,5 % stabilizuje perlit, zvyšuje tvrdost a mechanické vlastnosti litiny. Pro legování se využívá velmi čistá měď. [5] Měď v litinách výrazně podporuje korozivzdornost. [3]

2.3.2.6 Vliv chromu

Chrom je karbidotvorný prvek podporující metastabilní tuhnutí. Nejčastějším zdrojem chromu je ocelový nebo litinový šrot. Zvyšuje pevnost a tvrdost litiny. Chrom pomáhá tvořit jemnější grafit, ale pokud vzniknou volné karbidy, zhoršuje se obrobiteľnosť. Sklon ke vzniku karbidů se snižuje přidáním mědi. [5]

2.4 Značení litin s kuličkovým grafitem dle ČSN EN 1560

Litiny s kuličkovým grafitem se v ČR značí od roku 1997 dle převzaté evropské normy. Značení obsahuje písmena a číselné hodnoty, které odkazují na tvar grafitu, mechanické hodnoty, tvar zkušebních vzorků nebo podmínky zkoušení. Kromě normy EN ČSN 1560 se lze setkat s normami německými DIN, americkými ASTM a podnikovými. Základní značení s vysvětlením dle ČSN EN 1560 je uvedeno níže.

EN ČSN – GJ_{xy} – xxx – z

- GJ = G značí materiál na odlitky, J vyjadřuje litinu (jen pro zajímavost J, v podstatě značí psací I), protože v angličtině je litina s kuličkovým grafitem označovaná Spheroidal Graphite Cast Iron. V tomto značení EN ČSN – GJS – to znamená Graphite Iron Spheroidal (tak, že někdo to začal psát s velkým J a již to tak zůstalo).
- x = tvar grafitu:
 - L – lupínkový
 - S – kuličkový
 - M – temperovaný uhlík
 - V – vermikulární
 - N – litiny bez grafitu, ledeburitické
 - Y – zvláštní struktura
- y = pouze v případě, že je nutné označit litiny podle mikrostruktury nebo makrostruktury:
 - A – austenit
 - F – ferit
 - P – perlit
 - M – martenzit
 - L – ledeburit

- Q – kaleno
- T – kaleno a popuštěno
- B – temperované s černým lomem
- W – temperované s bílým lomem
- xxx = mechanické vlastnosti nebo chemické složení
 - nejčastěji se uvádí mez pevnosti v tahu
 - z = tažnost v procentech

2.5 Mechanické a fyzikální vlastnosti litin s kuličkovým grafitem

2.5.1 Mechanické vlastnosti

Litina s kuličkovým grafitem již podle svého dřívějšího názvu, kterým je tvárná litina, se některými svými mechanickými hodnotami blíží vybraným druhům ocelí. Základními mechanickými hodnotami, které sledujeme u LKG jsou mez v pevnosti v tahu, tažnost a tvrdost. Základní přehled je uveden v Tab. 1.

Mechanické hodnoty R_m , $R_p 0,2$ a A zjišťujeme při zkoušce tahem. Zkušební vzorek může být vyřezaný přímo z odlitku, zaformovaný například ke vtokové soustavě nebo odlévaný zvlášť do předem připravené formy.

Tvrdost u litin obecně měříme dle metody Brinella, kde vnikajícím indentorem je kulička. Zkouška je normována dle ČSN EN ISO 6506. Ve slévárnách je často používán způsob měření tvrdosti pomocí Poldi kladívka. Výhodou použití Poldi kladívka je rychlost, možnost dostupnosti měření téměř všude na odlitku a malá náročnost na obsluhu. Mezi nevýhody patří nízká přesnost a subjektivní odečítání hodnot kontrolorem při měření průměrů vtisků na odlitku a zkušebním tělese.

Tabulka 1 – Mechanické hodnoty vybraných LKG, vlastní úprava [6]

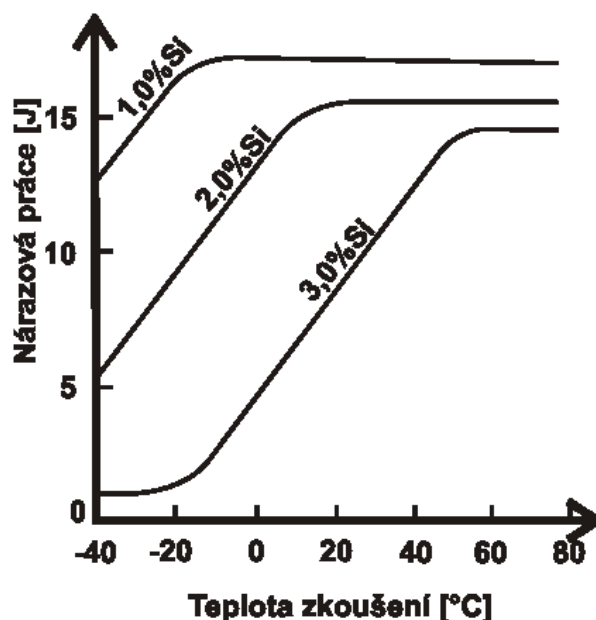
Označení materiálu	R_m [MPa]	$R_p 0,2$ [MPa]	A [%]	Tvrdost HB
EN – GJS – 350 - 22	350	220	22	< 160
EN – GJS – 400 - 15	400	250	15	135 - 175
EN – GJS – 400 - 8	400	250	18	130 - 175
EN – GJS – 500 - 7	500	320	7	150 - 230
EN – GJS – 600 - 3	600	370	3	180 - 270
EN – GJS – 700 - 2	700	420	2	210 - 305
EN – GJS – 800 - 2	800	480	2	240 - 335

EN – GJS – 900 - 2	900	600	2	270 - 360
--------------------	-----	-----	---	-----------

Již samotná přítomnost grafitu zmenšuje plochu průřezu namáhané plochy, neboť má minimální pevnost oproti kovové matici. Dalším aspektem je tvar grafitu. U LKG je již dle názvu grafit vyloučený ve tvaru kuliček, které mají malý odpor proti vrubovému namáhání.

Nárazová práce je u litin s kuličkovým grafitem závislá zejména na struktuře. Litina tvořená perlitem má menší vrubovou houževnatost než litina, která je tvořená feritem. Nárazová práce je dle ČSN EN ISO 1563 uváděna pouze u litin EN GJS-350 a EN GJS-400. Norma dále uvádí tvary zkušebních těles a teplotní podmínky, za kterých dané zkoušky probíhají.

Tranzitní teplota je sledovaným parametrem z konstrukčního hlediska. Udává nám přechod mezi křehkým a tvárným lomem. Tranzitní teplota je výrazně ovlivněna množstvím křemíku v litině. Pro aplikace odlitků s LKG, u kterých je předpoklad mechanického namáhání za nízkých teplot, je vhodné volit litiny s nízkým obsahem křemíku, viz Obr. [4]



Obrázek 6 - Vliv křemíku na nárazovou práci [5]

2.5.2 Fyzikální vlastnosti

Vlastnosti LKG jsou ovlivněny grafitem, jeho množstvím a tvarem. Hustota litiny je oproti oceli o cca 10% nižší a dosahuje hodnot mezi 7050 až 7350 kg.m⁻³.

Tepelnou vodivost také ovlivňuje grafit. Čím je jeho množství ve struktuře litiny větší, tím má daný materiál vyšší tepelnou vodivost. Pro LKG se tepelná vodivost pohybuje od 32 do 38 W.m⁻¹.K⁻¹.

Elektrickou vodivost opět ovlivňuje množství grafitu ve struktuře. Čím méně je grafit zastoupen, tím lepší elektrická vodivost. [1]

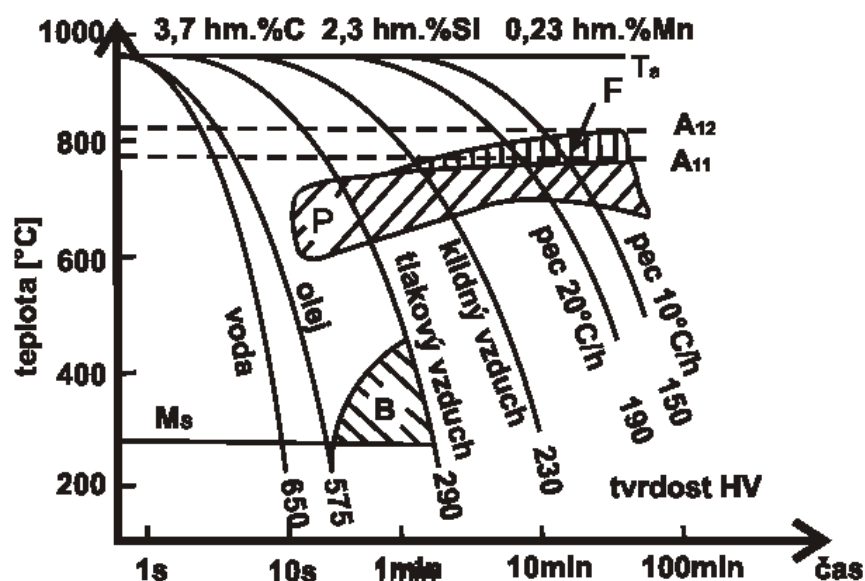
2.6 Tepelné zpracování litin s kuličkovým grafitem

Rozložení grafitu v kovové hmotě má velmi malý vliv na mechanické nebo fyzikální vlastnosti litiny. Základem je tedy samotná kovová hmota, která na sebe váže významný podíl těchto vlastností. Již od počátku vývoje LKG se část výzkumu věnovala následnému tepelnému nebo chemicko-tepelnému zpracování odlitků s cílem vhodně upravovat jejich vlastnosti pro různá použití. Vhodným tepelným zpracováním a legováním můžeme dosáhnout tažnosti blížící se hodnotě 40 %, tvrdosti 60 HRC a mezi pevnosti až 1500 MPa.

Moderní aplikace tepelně nebo chemicko-tepelně upravených litin nahrazují odlitky, které dříve byly vyráběny z ocelí nebo z temperovaných litin. [3]

2.6.1 Kalení a popuštění

Hlavním cílem kalení je zvýšení ořezavzdornosti a zvýšení mechanických hodnot daného odlitku. Teplota austenitizace se pohybuje v rozmezí 850 a 950 °C. Výdrž na dané teplotě se volí podle disperzity vyloučeného grafitu a teploty austenitizace. [1]



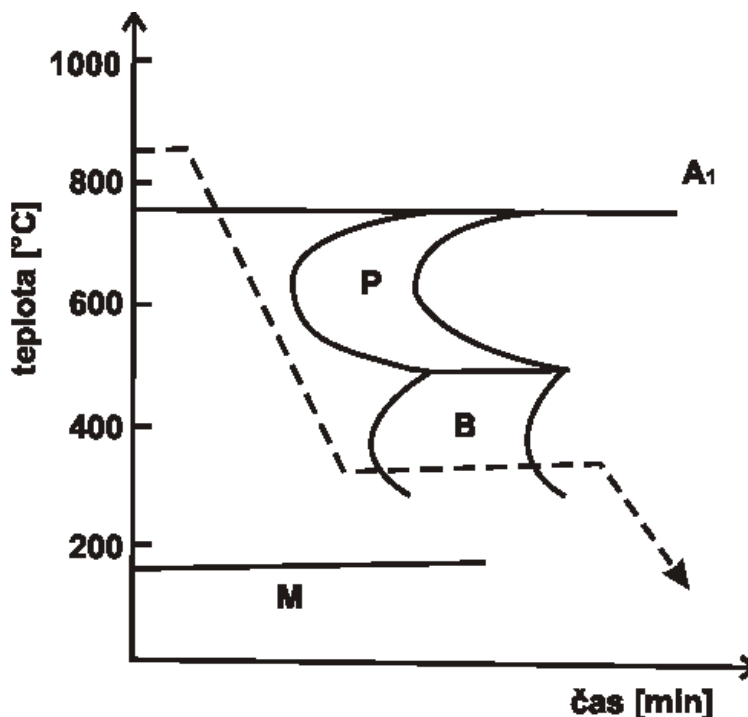
Obrázek 7 – ARA diagram nelegované LKG [1]

Jako vhodné kalicí médium se používá olej, méně často voda, která je velmi intenzivní. Volba kalicího média závisí zejména na tloušťkách stěn daného kaleného odlitku. Pro martenzitickou strukturu se doba chlazení uvažuje do 18s viz Obr. 7.

2.6.2 Izotermické kalení

Jedná se o tepelné zpracování litiny s kuličkovým grafitem, při kterém se získává austeniticko-bainitická struktura litiny. Litiny po izotermickém kalení s bainitickou strukturou dosahují pevnosti v tahu 800 až 1400 MPa při tažnostech do 15 %. Austenitizace se provádí při teplotách 850 až 950 °C po dobu 1 až 3 hodin. Jako ochlazovací médium se volí horký olej, proudící vzduch nebo solné lázně. Schematicky je izotermické kalení zobrazeno na Obr. 8. [1] Při bainitické prodlevě ve vrchní oblasti hodnot se získá vyšší tažnost a houževnatost. V nižší oblasti teplot se dosahuje vysoké tvrdosti a pevnosti.

Vzhledem k velké rychlosti ochlazování je u silnostěnných odlitků nutné snížit rychlost legováním niklem, mědí nebo molybdenem. Nevýhoda legování těmito prvky je možnost vzniku strukturní nehomogenity a karbidů. [3]

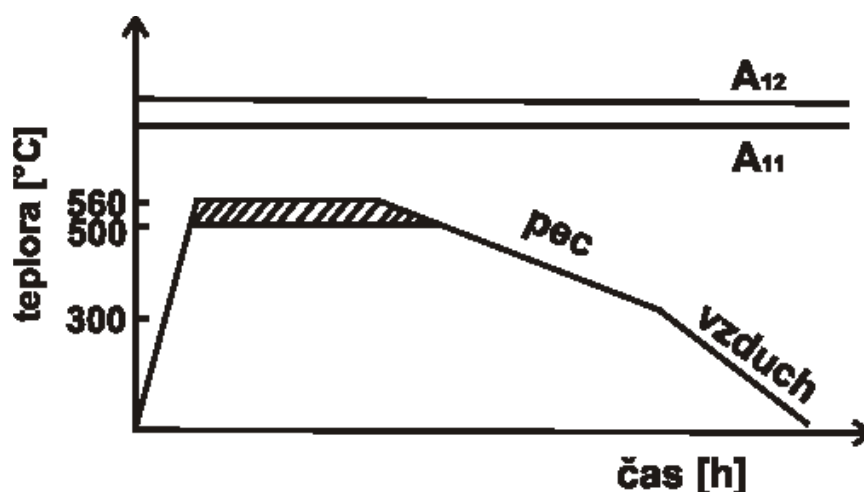


Obrázek 8 – Schéma výroby ADI litiny. Izotermické kalení [1]

2.6.3 Žihání na odstranění vnitřního pnutí

Vnitřní pnutí vzniká v odlitku při bržděném smrštění, které zapříčiňuje odpor formy nebo jádra proti směru smrštění, různé tloušťky stěn, tryskání a v malé míře i apretace. Pnutí v odlitku může způsobit tvarové deformace a trhliny. [3]

Žihání na odstranění vnitřního pnutí probíhá bez rekrystalizace. Teploty prodlevy pro nelegované litiny se volí v rozmezí od 500 do 560 °C, pro litiny nízkolegované od 550 do 600 °C a pro litiny legované chromem, vanadem či molybdenem od 600 do 650 °C. Doba prodlevy se volí obvykle: 1 hod + 1 hod za dalších 25 mm tloušťky stěny. Ochlazování probíhá v peci rychlostí od 20 do 40 °C za hodinu do teploty 250 až 300 °C a dále pokračuje na vzduchu. Silnostěnné odlitky nebo odlitky z legovaných litin se ochlazují v peci až do teplot kolem 150 °C. Schematicky je průběh žihání na odstranění pnutí zobrazen na Obr. 9. [1]



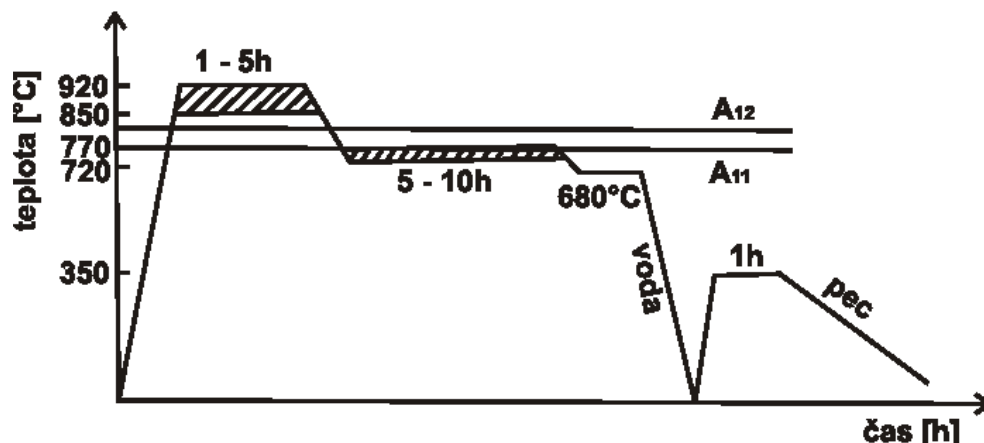
Obrázek 9 – Žihání na odstranění vnitřního pnutí [1]

2.6.4 Žihání na měkko

Odlitky žiháme na měkko, pokud potřebujeme zvýšit tažnost, zlepšit obrobiteľnosť alebo snížiť tvrdosť. Pod pojem žihání na měkko řadíme žihání feritizační a žihání na odstranění volných karbidů. Žihání na odstranění volných karbidů použijeme tehdy, pokud se ve struktuře litiny vyskytuje větší množství cementitu nebo jiných karbidů, kde jejich přítomnost zvětšuje tvrdost, zhoršuje obrobiteľnosť a způsobuje křehkost. [1]

Dvoustupňové feritizační žihání se používá u odlitků z litin s kuličkovým grafitem, u kterých požadujeme vysokou tažnost. Režim žihání se skládá z dvoustupňového žihání, ochlazení do vody a popouštění. První stupeň žihání probíhá

při teplotách 850 až 920 °C s výdrží 1 až 5 hodin a následným ochlazením v peci nebo na vzduchu do oblasti kritických teplot. Druhý stupeň žíhání probíhá při teplotách 720 až 770 °C s výdrží 5 až 10 hodin. Ochlazujeme v peci na 680 až 700 °C a následně ochladíme ve vodě. Po žíhání musí následovat popouštění, které probíhá při teplotách kolem 350 °C a ochlazením na vzduchu. Průběh dvoustupňového žíhání je zobrazen na Obr. 10. [1] [3]



Obrázek 10 – Dvoustupňové feritizační žíhání LKG [1]

2.7 Modifikace litiny s kuličkovým grafitem

Modifikace litiny s kuličkovým grafitem je bouřlivá reakce modifikačního prvku s taveninou (sféroidizační očkování). Jako modifikační prvek se v praxi nejčastěji používá hořčík, resp. jeho předslitiny FeSiMg. Lze ovšem použít i vzácné zeminy jako jsou cer, lanthan, prazeodym a neodym. [1]

2.7.1 Podstata modifikace

Podstatou modifikace litiny je rafinace taveniny. Páry hořčíku stoupají (probublávají) ode dna taveniny. Hořčík reaguje s kyslíkem, křemíkem a hlavně sírou. Velká část hořčíkových par pronikne na hladinu taveniny, kde shoří. Část, které se při probublávání hořčíku rozpustí v tavenině, vede k tvorbě požadovaného kuličkového grafitu. Hořčík, který zůstal v tavenině, se nazývá hořčík zbytkový – Mg_{zbyt} . Zbytkový hořčík po vhodné zvolené dávce modifikátoru se pohybuje od 0,03 do 0,07 %. [1] Při modifikaci taveniny probíhá k několika dějům, které jsou dle Hampla [7]:

1. Vypařování hořčíku – hořčík se vypařuje do plynné fáze a vlivem teploty taveniny také do atomárního stavu a absorbuje se na plochách zvětšujícího se krystalu grafitu. To způsobuje změnu rychlosti růstu krystalových ploch grafitu;
2. Desoxidace taveniny – dochází k odplynění a desoxidaci taveniny, zvyšuje se povrchové napětí taveniny a zlepšují se podmínky pro grafitizaci;

3. Změna podmínek nukleace – zvyšuje se podchlazení, mění se teplota a délka eutektické prodlevy.

2.7.2 Fyzikální a chemické vlastnosti hořčíku

Hořčík je lehký, tažný a středně tvrdý kov na pohled lesklý se zbarvením do stříbrna. Jeho hustota je 1738 kg.m^{-3} a krystalizuje v šesterečné krystalografické soustavě. Má dobrou tažnost a je snadno válcovatelný. Pro modifikaci LKG je podstatná zejména jeho teplota tání, která je 650°C a teplota vypařování (varu), která je 1107°C při tlaku 101 kPa. Rozpustnost hořčíku v železe při teplotě 1450°C s obsahem 2 % křemíku a tlaku okolí 101 kPa, se uvádí přibližně 0,085 % hořčíku. Hořčík v tavenině zvyšuje sklon k tvorbě zákalky a k metastabilnímu typu tuhnutí. [1] Ročně se vyrobí přibližně 100 mil. tun hořčíku. Vzhledem k tomu, že je hořčík obsažen v zemské kůře v odhadovaném poměru 2 až 2,5 % a také v mořské vodě, se jeho zásoby považují za neomezené. [3]

2.7.3 Modifikace předslitinami s křemíkem

Nejčastěji používaná předslitina pro modifikaci LKG je předslitina typu Fe-Si-Mg. Složení předslitiny je v Tab. 2, jde v podstatě o výběr modifikátorů pro polévací metody a jejich chemických složení od výrobce Snam Aloys PVT, Ltd (na trh v ČR dodává firma METOS v.o.s. pod obchodním názvem SNAMAG). [8]

Tabulka 2 – Přehled složení vybraných modifikátorů FeSiMg od fy. Snam Aloys PVT [7]

SNAMAG	Si [%]	Mg [%]	KVZ [%]	Ca [%]	Al [%]
3511	43 - 48	3,4 – 3,6	1,5 – 1,8	1,25 - 1,75	1 MAX
4512	43 - 48	4,2 – 4,5	1,1 – 1,3	1,8 – 2,0	1 MAX
5511	43 - 48	5,3 – 5,6	0,8 – 1,2	1,25 – 1,75	1 MAX
6001	43 - 48	5,5 – 6,5	není	1,0 – 1,4	1 MAX
6022	43 - 48	5,5 – 6,5	1,6 – 2,4	1,6 – 2,4	1 MAX
9501	43 - 48	9,0 – 10,0	Není	0,8 – 1,2	1 MAX

Křemíkové předslitiny jsou lehčí než modifikovaná litina (nižší hustota). Proto je při modifikaci nutné zajistit, aby taveninou probublávaly a nedošlo k rychlému vyplavení na povrch. Pro polévací metody je nejčastější obsah hořčíku do 10 % pro metody, pro řízené metody modifikace je možné využít modifikátory s obsahem

hořčíku až 25 %. Obsah vápníku je diskutabilní. Vápník zvětšuje nebezpečí vzniku zákalky, ale také snižuje zákalku. [1]

Modifikátor je pro polévací metody dodáván v rozličných zrnitostech a různých baleních přesně dle potřeby dané slévárny. Plněné profily pro modifikaci drátem se opět dodávají v různých průměrech s různým obalem a plněním, např. obal FeSiMg a náplní z čistého hořčíku. [8]

2.7.4 Modifikace předslitinami s niklem

Modifikační předslitiny s obsahem niklu jsou těžší než litina, není tedy nutné zvlášť řešit způsob podání. Lze modifikovat i pouhým vhozením do pánve. Nejčastěji se vyrábí s obsahem hořčíku 4 až 6 % nebo 14 až 17 %. Využití hořčíku se pohybuje kolem 50 až 70 %. Výhodou je, že reakce je klidnější, se sníženou oxidací na hladině. Nevýhodou jsou vysoké náklady v porovnání s předslitinami na bázi FeSiMg. Niklové předslitiny se používají při výrobě austenitických LKG, tzv. niresistu. [9]

2.7.5 Modifikace kovovým hořčíkem

Modifikátory na bázi kovového hořčíku jsou nejčastěji používané v kusové podobě, patronách nebo cihlách. Vlastní použití doprovází silná reakce vyvolaná rychlým a prudkým vypařováním hořčíku navíc spojená s rozstříkáním kovu a vysokými ztrátami hořčíku.

Metoda nachází využití tam, kde je možné regulovat pracovní tlak, např. ve sferoklávu nebo tam, kde je možné regulovat přístup kovu k modifikátoru – metody MAP nebo konvektor.

Nevýhodou využití kovového hořčíku jako modifikátoru jsou vysoké investiční náklady, absence doprovodných prvků jako jsou zejména Al, Ca či Ce a tím vznikající nutnost taveninu více očkovat. [3] Mezi výhody patří to, že se do taveniny nevnáší křemík, tudíž je možné zpracovat veškerý vratný materiál, vysoká účinnost odsíření a vzhledem k absenci hliníku a vápníku vzniká menší množství strusky. [1]

2.7.6 Dávkování modifikátoru

Zvolit vhodné dávkování modifikátoru pro výrobu litiny s kuličkovým grafitem je základním stavebním kamenem pro její úspěšnou výrobu. Modifikace litiny s kuličkovým grafitem je ovlivněna ztrátami hořčíku těmito způsoby [7]:

- spotřeba hořčíku na 1 hmotnostní díl síry je 0,76 dílu hořčíku. Vzniklý MgS tvoří sekundární strusku;

- spotřeba hořčíku na vazbu kyslíku rozpuštěného v kovu redukcí oxidů s menší afinitou ke kyslíku a na vazbu komplexních hořečnatých sloučenin;
- vlastní modifikací dochází v důsledku rychlé reakce k vypařování hořčíku a úniku par z taveniny.

Součet výše uvedených způsobů ztráty hořčíku při modifikaci určuje využití hořčíku η_{Mg} .

Výpočet % množství modifikačního prostředku se vypočítá ze vztahu:

$$m_{mod} = \frac{Mg_{zbyt} + 0,76 \cdot S}{\eta_{Mg} \cdot Mg_{pred}} \cdot 100 \cdot 100 \quad [\%]$$

Kde: m_{mod} – % množství mod. prostředku z hmotnosti kovu;
 S – obsah síry v modifikovaném kovu v %;
 η_{Mg} – využití hořčíku, kromě toho, který je vázán na síru v %;
 Mg_{zbyt} – zbytkový obsah hořčíku v litině v %;
 Mg_{pred} – obsah hořčíku v modifikátoru v %.

Reálně využití množství hořčíku se vypočítá ze vztahu:

$$\eta_{Mg} = \frac{Mg_{zbyt} + 0,76 \cdot S}{Mg_{pred} \cdot m_{mod}} \cdot 100 \cdot 100 \quad [\%]$$

2.7.7 Ztráty hořčíku po modifikaci

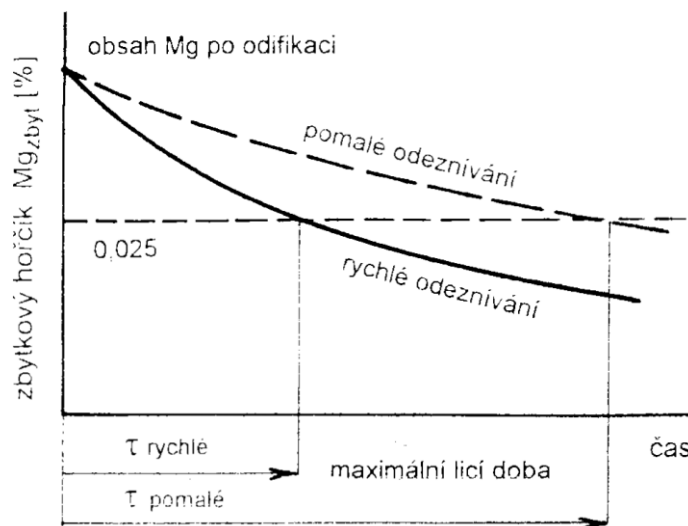
Po skončení vlastní modifikace dochází ke ztrátám hořčíku oxidací na hladině vzdušným kyslíkem. Ztráty jsou ovlivněny plochou hladiny. Čím větší je plocha, tím větší je ztráta hořčíku. Stejný vliv na ztrátu hořčíku má teplota taveniny, čím je vyšší teplota taveniny, tím je ztráta hořčíku vyšší. [5]

Ztráty hořčíku jsou způsobeny i reoxidací sekundární strusky. [9] Na hladině sekundární struska reaguje se vzdušným kyslíkem a vzniká oxid hořečnatý, který uniká z taveniny, jako bílý dým. Hořčík také reaguje se struskou a materiály, které se používají na vyzdívky. Vznikají křemičitany hořečnaté, které také tvoří sekundární strusku. Ta se postupně vyplavuje na povrch, ale také částečně zůstává v tavenině. [1]



2.7.8 Doba odeznívání modifikačního účinku

Doba odeznívání modifikačního účinku je definován jako doba, kdy je kov dostatečně modifikován. Časový účinek modifikátoru je určen z Mg_{zbyt} a ze samotné rychlosti odeznívání. Schematicky je uvedeno na Obr. 11. [1]



Obrázek 11 – Stanovení maximální doby lití [1]

Z Obr. 11 je zřejmé, že při použití velké pánve s nízkou teplotou taveniny, bez přelévání a s klidnou hladinou, vydrží modifikační účinek déle. [5]

2.8 Očkování

Očkování litiny s kuličkovým grafitem se provádí ze stejných důvodů jako očkování litiny šedé. Mezi hlavní důvody očkování patří zabezpečení dostatečného počtu grafitizačních zárodků při eutektické krystalizaci a tím omezení sklonu litiny tuhnout s vylučováním volného cementitu. Dalším úkolem očkování je podpořit vznik maximálního počtu zrn grafitu a eutektických buněk. Očkování LKG dává základní předpoklady pro vznik mechanických hodnot, které od materiálu očekáváme. [9]

Litina s kuličkovým grafitem po modifikaci má vysoký sklon k vylučování karbidů, tzv. volného cementitu a k vylučování grafitu v nedokonalé zrnité formě. Z těchto důvodů musí být LKG vždy po modifikaci grafitizačně (sekundárně) očkována. [3] Chemické složení vybraných očkovadel dodávaných na tuzemský trh je uvedeno v Tab. 3.

Tabulka 3 – Přehled vybraných očkovaadel [10]

Obchodní název	Si[%]	Ca[%]	Ba[%]	Sr[%]	Zr[%]	Ce[%]	Al[%]	Mn[%]
Superseed 75®	73 – 78	Max 0,10		0,60 až 1,00			Max 0,50	
Superseed 50®	46 – 50	Max 0,10		0,60 až 1,00			Max 0,50	
Reseed®	70 – 76	0,75 až 1,25				1,50 až 2,00	0,75 až 1,25	
SMZ®	62 – 69	0,60 až 1,90	0,30 až 0,70		3,00 až 5,00		0,55 až 1,30	2,80 až 4,50

Z Tab. 3, vyplývá, že většina očkovaadel na bázi FeSi je tvořena křemíkem s obsahem od 40 do 80 %, vápníkem s obsahem od 0,1 do 2 % a hliníkem s maximálním obsahem do 1,30 %. V menší míře očkovaadla obsahují prvky jako Zr, Ce nebo Ba. [10]

Dávkování očkovaadel je závislé na převažující tloušťce stěn odlévaných odlitků a na době lití, uplynulé od očkování. Stejně jako odeznívá modifikační účinek, tak odeznívá očkovací účinek. Nejúčinnější účinek očkování je ihned po vlastním očkování taveniny. Rozlišujeme očkování jednostupňové a očkování dvoustupňové:

- jednostupňové očkování – očkovaadlo je přidáváno do taveniny spolu s modifikátorem. Tento způsob se využívá v přelévacích metodách typu Sandwich a Tundisch;
- dvoustupňové očkování – očkování probíhá až po proběhlé modifikaci. Výhodou metody je její široké využití. Lze použít u všech metod modifikace. Způsob očkování je například plněním profilem, tělísky nebo přidáním očkovaadla do proudu taveniny. Dávkování očkovaadla do proudu kovu nebo pomocí očkovacích tělísek, lze snížit dávkování až na 0,1 – 0,2 %. [1]

2.9 Metody modifikace litin s kuličkovým grafitem

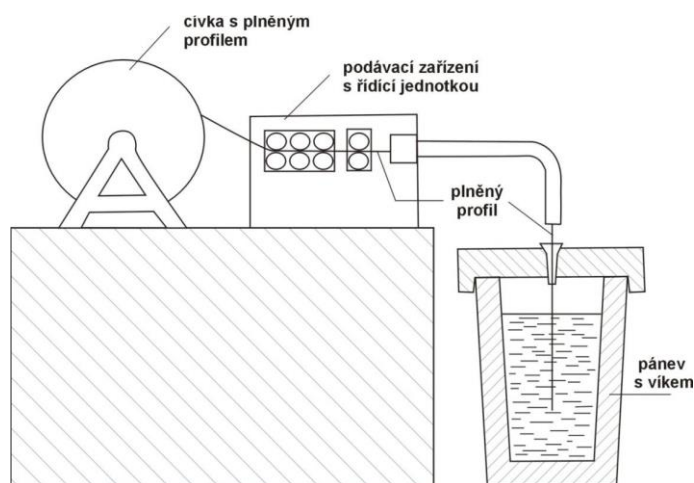
Technologií jak modifikovat litinu s kuličkovým grafitem je v praxi používáno kolem 40, ale patentováno přes 220. [3] Různé technologie modifikace se od sebe liší použitím modifikačních prostředků, různým procentuálním využitím hořčíku, způsobem vpravení modifikátoru, kapacitou a také finančními náklady jak na

investice, tak na provoz. Zjednodušené dělení často používaných metod je dle Hampla [7]:

- plněnými profily;
- polévací;
- konvertorové;
- kontinuální;

2.9.1 Metoda plněných profilů

Jedná se o metodu často využívanou pro svoji jednoduchost, spolehlivost a relativně nízké investiční náklady. Principem metody je, že do roztavené litiny zasouváme plněný profil určitou rychlostí. Plněný profil, resp. modifikační drát, je vyráběn v několika průměrech a dodáván svinutý nebo přímo v cívkách. Přes rovnací a podávací zařízení je modifikační drát zasouván do pánve skrz její víko. Rychlost podávacího zařízení musí být nastavena tak, aby k roztavení modifikačního drátu došlo u dna pánve, ale nedošlo k dotyku o stěnu pánve [3]. Zařízení pro metodu plněnými profily je schematicky zobrazeno na Obr. 12.



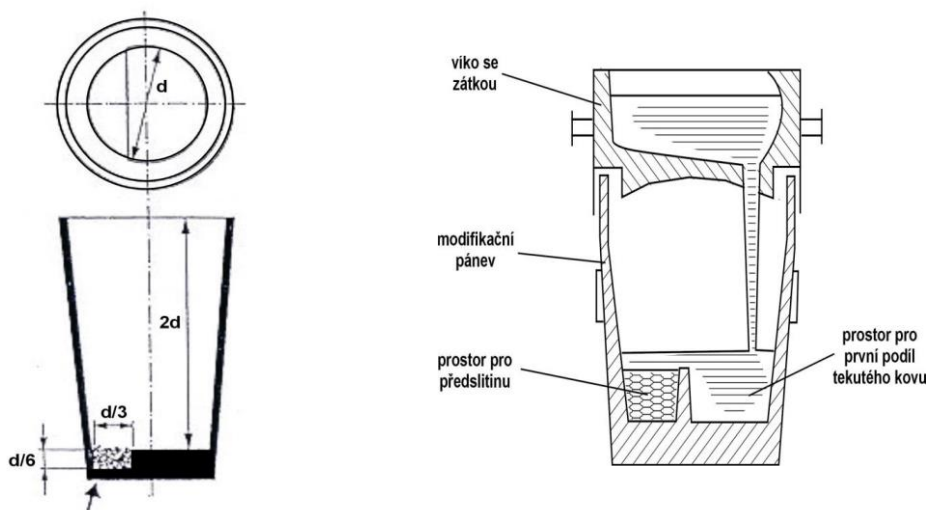
Obrázek 12 – Schéma modifikace LKG pomocí modifikačního drátu [7]

Využití hořčíku je v závislosti na teplotě taveniny a obsahu síry od 40 do 70 %. Obsah síry je teoreticky neomezený, ale vzhledem k finančním nákladům na plněný profil a na vlastní délku modifikace (čím více síry, tím větší spotřeba modifikačního drátu a tím větší časová náročnost na modifikaci), se v praxi používá litina s maximálním obsahem síry do 0,020 % hm, výjimečně do 0,03 % hm. [3]

Většina zařízení umožňuje podávání více profilů současně. Lze tak provádět současně grafitizační očkovaní. Pokud zařízení tuto možnost nemá, očkuje se nejčastěji do proudu taveniny. [7]

2.9.2 Metoda polévací

Jednoduché metody, v některých případech nevyžadující žádné finanční náklady. Polévací metody umožňují výrobu velkých pánví o objemu až 70 tun. [3] Obecnou nevýhodou těchto metod je nízké využití modifikátoru. Principem polévacích metod je umístění modifikátoru do spodku pánve a její naplnění taveninou. Pánve mohou být obyčejné s plochým dnem, kde modifikátor je umístěn co nejvíce k jedné straně a tavenina je nalévána co nejvíce na druhou stranu nebo se jedná o pánve s komůrkou či přepážkou. Dále je modifikátor kryt ocelovými plechy nebo třískami pro zpomalení rozpuštění modifikátoru. Lepší využití modifikátoru umožňuje technologie zvaná Tundish-Cover. Pánev je vybavena víkem, které mírně zvyšuje tlak.



Obrázek 13 – Schéma metody Sandwich (vlevo) a metody Tundish-Cover (vpravo) [7]

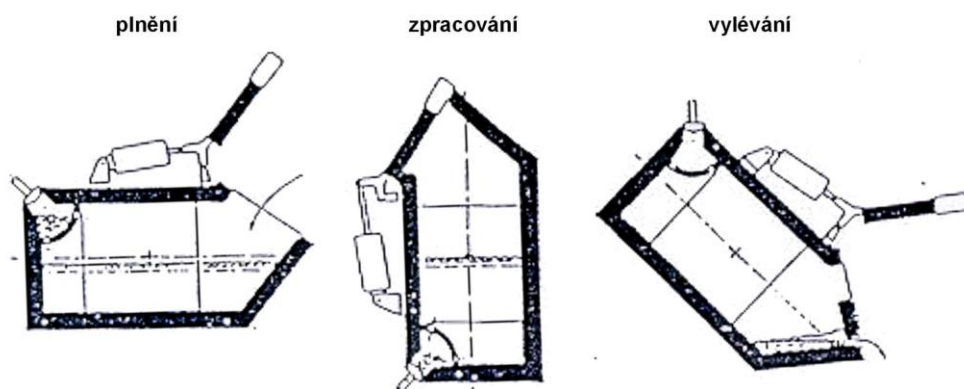
Konstrukce pánve musí být ideálně štíhlá, aby se docílilo vhodné modifikace. Štíhlost pánve se uvádí jako její výška $h = 1,5 \cdot d$, kde d je průměr pánve. Schéma polévacích metod je zobrazeno na Obr. 13.

2.9.3 Metoda modifikace pomocí konvertoru +GF+

Metodu vyvinula firma Georg Fischer (dále GF) ve Švýcarsku mezi lety 1968 až 1970. Jde o ve světě velmi využívanou metodu zejména proto, že lze použít i litiny vyrobené v kuplovnách. Konvertory se vyrábí nejčastěji ve velikostech od 500 do 3000 kg. Firma GF ovšem nabízí i výrobu modifikačního zařízení tzv. na míru. [11]

Konvertor, je nádoba, která je sklopná podél své příčné osy. V horní straně je nalévací otvor a na spodní nebo boční straně u dna je umístěna speciální komůrka, do které se umísťuje modifikátor. Modifikační komora je tvořena nebo celá uzavřena grafitovou deskou s otvory. Jako modifikátor se využívá čistý hořčík, který má výtěžnost od 50 do 70 %. [5]

Průběh modifikace probíhá tak, že modifikační komůrka je naplněna čistým hořčíkem a konvertor litinou určenou k modifikaci. Otočením konvertoru do svislé polohy se tavenina přes otvory v grafitovém víku dostává do kontaktu s hořčíkem a dochází k modifikační reakci. Po skončení modifikace se modifikovaná tavenina vyleje do předehřáté lící pánve a proces se může opakovat. Princip je schematicky znázorněn na Obr. 14. [5]



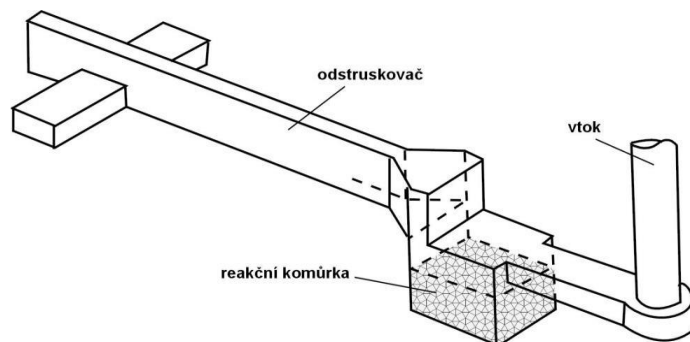
Obrázek 14 – Schéma metody Sandvich (vlevo) a metody Tundish-Cover (vpravo) [7]

Nevýhoda této metody jsou vysoké pořizovací náklady (hampl). Firma GF nabízí i mobilní konvertory, které se dají umístit na různé vozíky nebo zavěsit na jeřáb a modifikovat blíže nebo přímo na lícím poli. Výhodou modifikace na lícím poli je větší časové okno pro odlévání, minimalizace prostoje a tím možnost odeznění modifikačního účinku. [3]

2.9.4 Kontinuální metody

Metody založené na principu postupné modifikace taveniny. Při metodě In Mold je natavená litina modifikována přímo ve vtokové soustavě formy. Při metodě Flotret je modifikátor umístěn v reakční komoře, odkud je po modifikaci přeléván do lící pánve. [7]

Výhodou metody In Mold je plnění formy ihned po modifikaci. Nehrozí tedy odeznění modifikačního účinku. Vtoková soustava pro metodu In Mold je na Obr. 15.



Obrázek 15 – Vtoková soustava pro metodu In Mold [4]

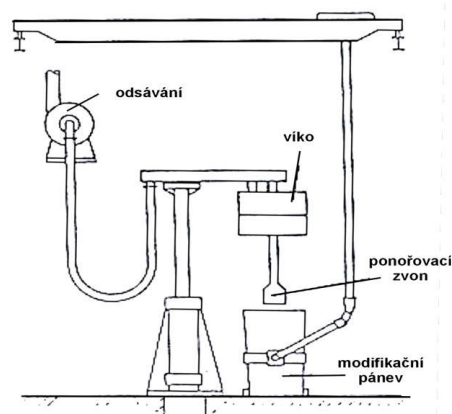
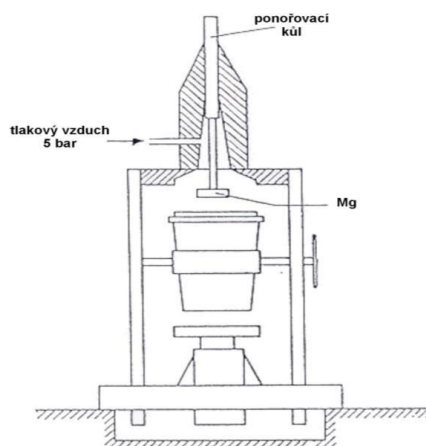
Pro modifikaci se využívá hlavně předslitin na bázi FeSiMg s obsahem od 3 do 7 %. Obsah síry musí být do 0,01 % z důvodů vzniku strusky přímo ve vtokové soustavě. Strusku vzniklou ve vtokové soustavě zachycujeme do filtrů. Pokud by byl obsah síry vyšší, mohlo by dojít k ucpání filtru struskou a k neodlití odlitku nebo k pomalému lití odlitku a vzniku nezaběhnutí nebo studených spojů. [3]

Metoda je využívána v automobilovém průmyslu a ve výrobě s hromadnou produkcí. Důvodem jsou vysoké nároky na stabilitu procesů a vstupních surovin. [5]

2.9.5 Ponořovací metody

Ponořovací metody dělíme na atmosférické a na přetlakové. U atmosférické metody je modifikátor ve formě předslitiny hořčíku o obsahu až 40 % ponořen v koši do taveniny. Umístění taveniny v koši umožňuje umístění až ke dnu pánve a tím zajištění dostatečného prostupu par hořčíku a také zabránění vyplavení modifikátoru na hladinu taveniny. Pánev je uzavřena víkem, které zvyšuje účinnost modifikace.

Přetlaková metoda nabízí několik výhod, které jsou ovšem spojeny s riziky. Mezi výhody řadíme vysoké využití modifikátoru a možnost regulace tlaku na hladinu. Nevýhodou jsou mimo velkých pořizovacích nákladů i velké požadavky na bezpečnost. Pánev je vlastně tlaková nádoba s natavenou taveninou o teplotě až 1600 °C. [7] Schéma obou metod je na Obr. 16.



Obrázek 16 – Schéma Podtlakové metody modifikace vlevo, atmosférické vpravo [7]

2.10 Tavicí zařízení vhodné pro výrobu litiny s kuličkovým grafitem

2.10.1 Vsázkové suroviny

Vsázka pro výrobu litin a litin s kuličkovým grafitem je složená ze surového železa, litinového odpadu (vratný materiál), ocelového odpadu, legur, nahličovadel, struskotvorných přísad a modifikátorů.

- Surová železa – základní materiál každé vsázky, dle ČSN-EN-42 1221 se rozděluje podle obsahu základních prvků na slévarenská surová železa, které mají obsah uhlíku od 3,75 do 4,25 %. Ocelárenská surová železa, která mají obsah uhlíku od 4,20 do 4,70 %. Na výrobu litin s kuličkovým grafitem se používají surová železa s nízkým obsahem manganu, fosforu a především síry. Speciální legovaná surová železa, která mají zvýšený obsah legur jako jsou například nikl, vanad, fosfor, chrom či měď. [12]
- Vratný materiál – nálitky, části vtokových soustav, výztuhy či zmetková výroba. Před použitím se materiál třídí. Minimální rozdělení vratného materiálu je na litinu s lupínkovým grafitem a na litinu s kuličkovým grafitem. Pokud se produkují speciální legované litiny je potřeba důsledně třídit a selektovat. Výhoda vratného materiálu je, že známe jeho chemické složení.
- Ocelový odpad – nejčastěji ve formě lisovaných balíků složených z odstřížků hlubokotažených plechů viz Obr. 17, s minimálním obsahem legujících prvků. Používají se na snížení obsahu síry a uhlíku. [9]
- Legury – nejčastěji ve formě feroslitin. Mohou se přidávat do vsázky nebo až následně do taveniny. Jako mikrolegury se používají cín, vápník, titan aj.
- Nahličovadla – používají se v elektrických pecích pro zvýšení obsahu uhlíku.



Obrázek 17 – Ocelový odpad (nahore) a vratný materiál (dole)

2.10.2 Výroba taveniny pro LKG

Tavení litin pro výrobu hmotných odlitků z LKG probíhá v současné době téměř vždy v elektrických indukčních pecích. Dřívější tavení litiny v kuplovnách je dnes s ohledem na extrémně vysoké nároky na ekologický provoz, minimální prašnost a vznik emisí velmi složité a zařízení, které eliminují tyto průvodní jevy, jsou dražší, než přechod na elektrické indukční pece. Vzhledem k variabilitě vsázky u indukčních pecí je jejich provoz pružnější a lépe odpovídá modernímu pojetí plánování výroby. Umožňují přesné chemické složení taveniny, přesné množství (hmotnost nataveného kovu), mají velmi malý propal vstupních surovin a tavenina je také ihned připravena k modifikaci. [3] Při tavení litiny v kuplovně je nutné před modifikací provést proces odsíření, což vyžaduje další ekonomické náklady, čas a v neposlední řadě také udržovací pece pro udržení teploty. [1]

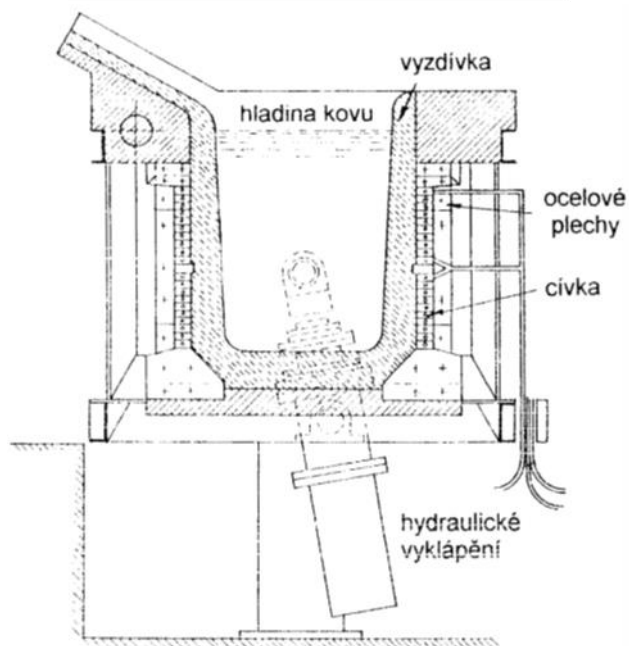
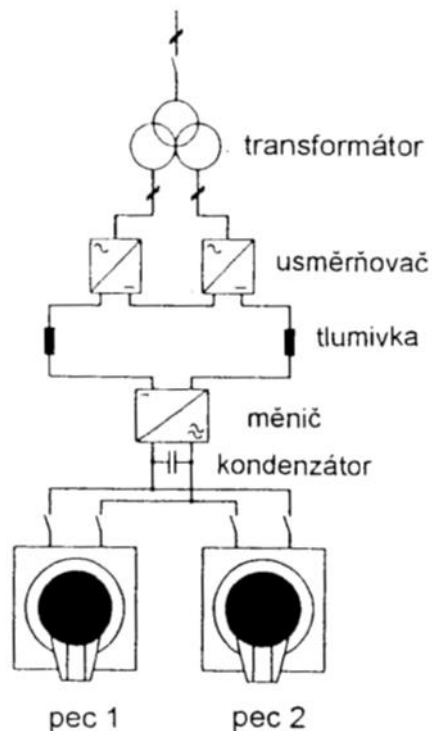
2.10.2.1 Indukční pece

Konstrukce Indukčních pecí se rozděluje na pece kelímkové (častější) a kanálkové. V obou případech dochází k indukčnímu ohřevu působením magnetického pole, které vzniká v cívce při průchodu střídavého proudu. Podmínkou je, že v daném magnetickém poli se musí nacházet elektricky vodivý materiál, který indukuje

elektrické napětí. Vzniklé indukované napětí způsobuje silné vířivé proudy, které způsobují ohřev. Ohřev se uskutečňuje tzv. Jouleovým teplem. [1]

Dle frekvence proudu se pece dále dělí na středofrekvenční a na pece se sítovou frekvencí. Středofrekvenční pece jsou napájeny střídavým el. proudem s frekvencí v rozsahu 120 až 1000 Hz, kde pro průmyslové použití nejčastěji využíváme pece s objemem do 6 tun a frekvencí el. proudu kolem 250 Hz. Pece pracují se sítovou frekvencí využívají el. proud s frekvencí proudu 50 Hz. Základní části středofrekvenční kelímkové pece dle Roučky [1] jsou:

- transformátor – transformuje proud na provozní napětí a je připojený k síti vysokého napětí;
- usměrňovač – mění napětí ze střídavého na stejnosměrné;
- frekvenční měnič – převádí stejnosměrný proud na střídavý s danou frekvencí. K převodu využíváme tyristorové měniče, které dokáží měnit frekvenci dle požadavků;
- kondenzátorová baterie – zapojené na cívku paralelně a tvoří s ní oscilační obvod. Kondenzátory kompenzují indukční zatížení sítě.
- těleso pece – vlastní tavící kelímek, cívky s přívodem el. proudu, stínícího prstence, trafo plechů, sklápěcího mechanismu, zařízením pro vážení vsázky (nejčastěji tenzometry), zařízení pro odsávání zplodin nebo aspoň umístěný odsavný zvon nad tavící kelímek;
- tavící kelímek – s taveninou přichází do styku žáruvzdorná vyzdívka, které je nejčastěji tvořena speciálními žáruvzdornými betony a šamotovými cihlami. Vyzdívka obvykle dosahuje životnosti do 400 taveb (v praxi do 300). [3] Po uplynutí této doby se musí kelímek odstavit, vybourat a znovu vyzdít či vydusat.



Obrázek 18 – Schéma konstrukce a uspořádání indukčních pecí [1]

Řízení pecí je prováděno pomocí tavicího procesoru, který upravuje příkon tavicímu výkonu pece s ohledem na teplotu kovu a naplněnost tavicího kelímku. Dále hlídá nastavené parametry, celkový výkon a jeho rozdělení mezi kelímky. Hmotnost kovu se zjišťuje nejčastěji tenzometrickými vahami nebo převážením vsázky před

nasypáním do pece. Teplota kovu je měřena kontinuálně termočlánky nebo pomocí pyrometru. Celé řízení procesu je ovládáno přes PC, kde se také zobrazují výrobní informace. Řídící PC bývá často napojeno na informační systém slévárny, takže je v něm zobrazeno i plánování výroby a lze do něj přímo přenášet požadavky (objednávky) na množství a druh materiálu a tím plánovat provoz taveb a vydávání nataveného železa. [3]

Výhodami indukčních elektrických pecí jsou zejména snadná regulace procesu tavení, možnost dosáhnout vysoké teploty tavení a snadná úprava chemického složení. Dále také velká rozmanitost v použití vsázkových surovin. Míchání lázně vlivem vířivých proudů zaručuje výbornou homogenitu teploty i chemického složení. Indukční pece se vyznačují velmi nízkým propalem prvků. [1]

2.11 Formovací a jádrové směsi vhodné pro výrobu hmotných odlitků z LKG

Pro výrobu hmotných odlitků z litiny s kuličkovým grafitem se používají formy netrvalé, sloužící na jedno odlití. Po odlití a vychladnutí odlitku dojde při vyjímání odlitku k rozpadu formy a jader. Formy, které se nejčastěji používají, jsou na bázi pískové nebo na bázi pryskyřice. Důvodem použití jednorázových forem a jader je předpoklad kusové nebo malosériové výroby. V návaznosti je ekonomické hledisko, kde cena modelového zařízení, které musí být uzpůsobeno formovací směsi a dané technologii je pro ruční formování do pískových směsí na bázi furanových pryskyřic nejlevnější.

Formovací směs se skládá z ostřiva, pojiva a přísad. Ostřivem ve směších pro výrobu hmotných odlitků je nejčastěji křemenný písek o zrnitosti $d_{50} = 0,27$ mm [13]. Pojivo je spojující část, která je tvořena látkou nebo směsí látek, které dají ostřivu požadovanou pevnost, tuhost a vaznost při formování, odstání formy i samotném odlévání. Popř. se do směsí přidávají přísady, které zlepšují technologické vlastnosti formovacích a jádrových směsí. [14]

2.11.1 Furanová pojiva

Obecně se furanová pryskyřice, resp. furanové pojivo skládá z tzv. předkondenzátu (tím je fenol-formaldehyd-močovinová pryskyřice), který je rozpuštěn v čistém furfurilalkoholu. Tvrdidlem bývá především roztok na bázi arylsulfonové kyseliny.

Furanová pojiva se používají mimo samo tvrdnoucí směsi ještě pro technologie HOT-BOX a pro samo tvrdnoucí směsi s řízeným tuhnutím za pomoci SO_2 . [14] Furan

je pojmenován po heterocyklickém uhlovodíku – furanu či furfuranu. Furan obsahuje dehty z jehličnatých stromů, kukuřičné palice nebo slámy. Synteticky lze vyrobit z kyseliny tetrahydroxyadipové a to dekarboxylací nebo dehydratací. [13]

2.11.2 Samotvrdnoucí furanové směsi

Furanová formovací směs se připravuje v kontinuálním mísiči (skládá se ze stojanu a dvou či více kloubových ramen). Písek (nový a popř. regenerovaný) je do prvního ramene průběžně dávkován z návazných zásobníků. V tomto prvním rameni je písek navzájem homogenizován. Mísení písku s pryskyřicí a s katalyzátorem probíhá v navazujícím mísicím rameni. Zde je hřídel opatřená lopatkami nebo šnekovou hřídelí a mísení probíhá kontinuálně. Předem nastavený časový dávkovač spustí tok katalyzátoru. V okamžiku když se dostane suchý písek před vstřikovací trysku katalyzátoru a následně se spustí tok pryskyřice, je to právě v okamžiku když se již písek s katalyzátorem dostane před vstřikovací trysku pryskyřice. Míchání pokračuje, než se smíchaný písek s pryskyřicí nedostane k výstupu míchacího zařízení. Doba od vstřiku pryskyřice do písku až po namíchání směsi trvá 10 až 15 s. Množství písku, které prochází mísičem, bývá až desítky kg za sekundu. Příklad mísiče je zobrazen na Obr. 19 V namíchané formovací směsi se již písek označuje ostřivem.



Obrázek 19 - Mísič pro přípravu furanové směsi

Reakce vytvrzování je exotermická a vzniká při ní voda. Postup vytvrzování probíhá od povrchu dovnitř do forem či jader. Formy i jádra se často suší horkým vzduchem pro lepší a rychlejší odpaření vzniklé vody.

Při výrobě hmotných forem se zpravidla furanová směs syje na model v rámu, dále se směs rozhrnuje a podle potřeby se směs místně zhušťuje. Zpevnění směsi se

děje chemickou reakcí pojivového systému. Formovací rám zaplněný formovací směsí se ponechá po určitou dobu až do doby vytvrzení na požadovanou hodnotu. Pak se z formy, nejčastěji prostřednictvím jeřábu, vyjme model. Po drobných úpravách dutiny formy a po ošetření lihovým nátěrem jejího líce se provádí odlití.

2.11.3 Chromitová ostřiva a směsi

Pro výrobu forem, ale zejména jader pro hmotné odlitky se využívají celé, lepené (vlepované) nebo obkládané jádra z chromitového ostřiva s furanovým pojivem. Chromitové ostřivo má vyšší tepelnou odolnost než křemenné a výrazně nižší sklon k penetraci taveninou, vzniku připečenin a rozpadu jader.

Pro slévárenství využíváme tzv. keramické chromity, které obsahují 45 až 48 % Cr_2O_3 a maximálně 12 % Fe. Hodnota pH se pohybuje v rozmezí 7 až 9. Vysoká alkalita způsobuje větší nutnou spotřebu kyselých katalizátorů a v případě furanových směsí způsobuje větší spotřebu kyseliny. Chromitová zrna jsou temně černá a mají polyendrický tvar. Výhodou použití chromitových ostřiv je jejich tepelná odolnost. Tavení zrn začíná až při teplotě 1650°C . [14]

2.12 Nejčastější vady odlitků z LKG

Jako obecně každý odlitek, tak i odlitky z LKG vykazují určitou zmetkovitost nebo výskyt vad. Níže je uveden výčet nejčastějších vad. Značení, důvod vzniku a popis vad úzce souvisí s jejich nápravou. Nelze úspěšně zabránit vzniku vad, pokud ji nemůžeme pojmenovat a znát příčinu jejího vzniku.

Klasifikace vad dříve probíhala dle ČSN 42 1240. Norma klasifikovala 37 vad rozdělených do 7 tříd. V současné době se ve slévárnách využívá klasifikace podle (ASM) a její český překlad, který vyústil ve vydání monografie o vadách odlitků ze slitin železa. [15] Tato publikace rozděluje vady do 7 tříd označených čísly 100 až 700. Celkem rozlišuje 108 jednotlivých vad.

2.12.1 Bubliny 410

Bublinami v odlitcích rozumíme dutiny, které jsou na povrchu a to buď otevřené, nebo uzavřené uvnitř odlitku. Jejich výskyt může být jednotlivý, ve shlucích nebo mohou být rozloženy v celém objemu odlitku. Tvar bublin je nejčastěji kulový nebo elipsovitý. Podle původu vzniku bublin je Elbel [16] rozděluje na:

- endogenní bubliny, které vznikají, pokud tlak rozpuštěných plynů ve slitině nepřevýší odpor proti jeho úniku;

- exogenní bubliny, které vznikají při odlévání, když tlak plynů ve formě převyší odpor, který klade tavenina a tuhnoucí povrchová vrstva a plyny následně vniknou do taveniny a odlitku.



Obrázek 20 – Bublina v opracované ploše na odlitku z GJS-400-15

Dělení bublin dle příčiny je na bubliny způsobené kyslíkem, vodíkem nebo dusíkem. Každá z příčin má svůj číselný kód vady a to 411, 412 a 413.

Základní příčina vzniku bublin je, že při tuhnutí (méně pak při samotném odlévání) se v litině vlivem poklesu teploty rychle sníží rozpustnost plynů. Při překročení mezní rozpustnosti, která je závislá na složení slitiny, teplotě a tlaku se plyny vyloučí v molekulární formě a vytvářejí bubliny. Název výše uvedeného děje se nazývá heterogenní nukleace. [16]

2.12.2 Staženiny 440

Skupina vad staženin patří mezi závažné vady, které často vedou k vyřazení odlitku jako neshodné výroby. Jedná se o velmi často vyskytující se vadu u litin, ale obecně i u všech kovů a slitin. [15] Vznikají z důvodu objemového smrštění, které je průvodním jevem při tuhnutí kovu do pevné fáze.

Mezi staženiny řadíme otevřené staženiny (441), uzavřené staženiny (442), řediny (443) a staženiny a řediny od jader nebo od hran formy (444). Popis a charakteristika jednotlivých staženin [16]:

- otevřená staženina (441) – otevřené dutiny s oxidovaným a hrubě krystalickým povrchem. Nejčastější výskyt je pod nálitkem nebo v místě tepelného uzlu. Vyskytují se v místech odlitku, kde tavenina ztuhla jako poslední. Příčinou vzniku otevřené staženiny je nedostatek taveniny pro

kompenzací tuhnutí odlitku. Vznik otevřených staženin dále ovlivňuje vysoká lící teplota, nedolití nálitku, nedostatečné parametry nálitku, nevhodné umístění nálitku;

- vnitřní uzavřená staženina (442) – dutiny uvnitř odlitku, které se nacházejí v místě tepelného uzlu nebo pod ztuhlou částí stěny odlitku. Nejčastěji se nachází v horní části odlitku. Příčina vzniku je obdobná jako u staženin otevřených. Vada je zjiřitelná pomocí UT, RTG zkoušení nebo při destrukci odlitku (řezání, vývrty, obrábění);
- řediny (443) – jedná se shluk či řetězce drobných staženin, které vznikají v konečné fázi tuhnutí odlitku. Nejčastěji vznikají v tepelných uzlech nebo spojích odlitku (žebrování). Mimo výše uvedené příčiny se výskyt staženin přičítá i nekvalitním vsázkovým surovinám nebo vyššímu obsahu vodíku. Zjištění vady probíhá identicky jako u uzavřených staženin;
- staženiny nebo řediny od jader nebo hran formy (444) – jde o řediny nebo o vnitřní uzavřené staženiny způsobené smrštěním kovu při tuhnutí v oblasti tepelného uzlu, který je vytvořen prohřátým vnitřním jádrem nebo ostrou hranou formy. Důvodem vzniku je malá akumulační schopnost pravého jádra nebo hrany formy, kde se rychle ohřeje od tuhnoucí taveniny a tím naruší tepelnou osu odlitku a zapříčiní vznik řediny nebo uzavřené staženiny.



Obrázek 21 – Řediny na přírubě čerpadlového tělesa z materiálu GJS-400-15

2.12.3 Zadrobeniny 521

Zadrobeniny patří mezi vůbec nejčastější vady odlitků odlévaných do pískových forem. Jedná se o povrchové nebo uzavřené dutiny, které jsou vyplněné formovací nebo jádrovou směsí. Zadrobeniny řadíme mezi třídu vad makroskopické vměstky a vady mikrostruktury. Dříve se pod danou vadu řadily i jiné vady jako

rozplavený písek, sekundární struskovitost a jiné, ale dnes jsou již tyto vady uváděny samostatně. Identifikace příčiny vzniku zadrobenin je velmi obtížný úkol, protože místo vzniku může být v celém výrobním procesu odlitku. Příčiny vzniku zadrobenin shrnul Elbel [16] tak to:

- konstrukce odlitku – malé úkosity, ostré hrany;
- modelové zařízení a výtěžnost rámu – nevhodné rádiusy, nevhodný, ale hlavně opotřebovaný povrch. Na vznik zadrobenin má vliv i stupeň výtěžnosti rámu a složitost modelového zařízení;
- vtoková soustava – nevhodný výpočet, nedostatečné zabezpečení formy proti erozivnímu účinku nalévaného kovu – dopadová jádra, keramické trubky, celulózové;
- formování a skládání forem – málo nebo nepravidelně upěchovaná forma. Malé skládací vůle, nevyfoukané formy a použití nekvalitních formovacích směsí;
- výroba jader – nezačištěné dělicí roviny tzv. hřebínky, nedostatečné vypěchování jaderníků a použití nevhodných směsí na výrobu jader;
- pískové hospodářství – nedodržení technologického předpisu (nevhodně nastavené dávkování), použití nekvalitních surovin;



Obrázek 22 – Zadrobenina v opracované technologické ploše stojanové vrtačky

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část diplomové práce je zaměřena na výrobu hmotných odlitků z litiny s kuličkovým grafitem. Hlavním záměrem experimentální části diplomové práce je vyhodnocení metalografické struktury, stanovení mechanických vlastností a chemická analýza na vzorcích z hmotného odlitku (hmotnost 1850 kg), který se odlévá z materiálu ČSN-EN-ISO-400-18-LT.

V druhé části experimentální části diplomové práce byla provedena analýza vad, které se vyskytují na hmotných odlitcích (od 750 kg a výše) ze všech odlévaných litin s kuličkovým grafitem za období od 1. 4. 2019 do 1. 4. 2020.

3.1 Výroba hmotných odlitků

Výroba odlitku byla provedena na základě technologických a technických podkladů, které jsou vytvořeny pro úspěšnou výrobu hmotného odlitku z litiny s kuličkovým grafitem. K technologickým a technickým podkladům byly použity následně uvedené náležitosti a byly provedeny tyto základní činnosti:

- Postupový výkres – technický výkres, který je dopracován technologií slévárny a zobrazuje vtokovou soustavu a její umístění (na základě výpočtu). Umístění chladítek, výběhů, nálitků případně podpěrek či odplyňovacích kanálků. Postupový výkres také zobrazuje umístění a počet jader a případných volných částí. Výkres se značí postupovým razítkem, na kterém je uveden materiál, materiál modelového zařízení (dále jen MZ), třída přesnosti, třída přídavek na obrábění (pokud nejsou přídávky zakresleny přímo do výkresu) a pokud je MZ umístěno na desce, také rozměry desky. Postupový výkres je postupně nahrazován 3D daty.
- Modelové zařízení – je vyráběno v modelárně. Modelárna na základě postupového výkresu vyrobí modelové zařízení, zkontroluje ho a postoupí dále do výroby. Do procesu výroby modelového zařízení opět vstupovala 3D data, které ulehčovala samotnou výrobu modelového zařízení. K výrobě modelového zařízení byla použita překližka všeobecného použití (loupaná dýha lepená močovinoformaldehydovým lepidlem kolmo na sebe, materiál smrk nebo borovice).
- Výroba jader – začínala výrobou výztuh a háčků, které se dle příloh postupového výkresu (někdy oddělených návodek) zaformovávají do jader při formování. Výztuhy a háčky slouží ke zpevnění jader a k manipulaci s jádrem

při nanášení žáruvzdorného nátěru nebo při zakládání jádra do formy. Po vyjmutí jádra z jaderníku následovalo nanášení žáruvzdorného nátěru u menších jader ponořováním, u velkých jader poléváním. Jádra se po aplikaci nátěru sušila a vypalovala. Do velkých jader se při formování umísťovaly (vkládaly) odplyňovací kanálky, které slouží k odvodu plynu vznikajících po zahřátí jádra taveninou při odlévání.

- Výroba forem a formování – odlitky do cca 10 000 kg se formují do rámců. V rámu je umístěn model, který je postupně obsypáván formovací směsí z mísice (nutně ručně dopřechovat kritické místa). Pro výrobu forem byla použita formovací furanová směs, jejíž složení bylo z 84 % tvořeno furfylalkoholem. Dávkování pro dané typy odlitků je cca 0,85 % pryskyřice + 0,3 % tvrdidla. Po dokončení formování se forma nechala odstát a došlo k jejímu vytvrzení na vzduchu. Po uplynutí doby vytvrdnutí byl model vyjmut z rámu. Lic takto vyrobené slévarenské formy byl opatřen ochranným žáruvzdorným nátěrem, který byl následně vypálen.
- Metalurgická příprava taveniny pro výrobu odlitků s kuličkovým grafitem byla provedena v indukční středofrekvenční peci. Složení vsázky pro materiál GJS 400-18-LT je poměrově 35 % hlubokotaženého plechu (šrotu), 30 % surového železa (Sorel, FeC a zbytkové prvky v setinách %) a 35 % vratu slévárny (pouze vrat z GJS 400). Dolegovává se 2 kg FeMn. Teplota tavení 1440 °C. Chemické složení taveniny je uvedeno v Tab. 4, 5 a 6 pro jednotlivé odlévané odlitky. Postup při modifikaci a očkování je, že se přelije tavenina do licí pánve, která se zasune do modifikačního boxu, kde proběhne modifikace a očkování plněným profilem. Odlévalo se za teplot taveniny od 1370 do 1386 °C. V časech od modifikace 9, 8 a 11 minut. Čas lití od modifikace a teplota taveniny se zaznamenává do licí knihy. V případě odlévání velkého množství taveniny lze použít dvě licí pánve, kde odlévání probíhá simultánně. Tato možnost je výhodná pro velké deskové nebo dlouhé odlitky. Možnost lití ze dvou pánví se využívá také, a to když nelze vyrobit (modifikovat) větší množství taveniny naráz. Licí pánve před odléváním byly předehřáté na teplotu cca 450 °C.
- Tuhnutí a chladnutí odlitku - při výrobě hmotných odlitků je chladnutí odlitků velmi důležitým procesem. Jeho doba se stanovuje z hmotnosti odlitku, ale také závisí na počtu a velikosti jader. Podle empirických zkušeností bylo

prokázáno, že hmotný odlitek by se neměl vyjímat z formy při teplotě vyšší než je 100 °C. Pro hmotné odlitky (10 000 kg) s větším počtem velkých jader, která nejdříve z taveniny naakumulují teplo, může být doba chladnutí i přes 240 hodin (tj. 10 dní). Odlitky vyrobené v rámci řešení této diplomové práce chladly 50 až 56 hodin. V postupové kartě odlitku je minimální čas chladnutí stanoven na 48 hodin.

- Vytlučení odlitku z formy bylo prováděno na vytlučacím roštu, kde byl odlitek nadzvedáván a opět pokládán na třesoucí se vytlučací rošt. Vibrace roštu způsobily rozpad kompaktnosti nejen formy, ale i jádrové směsi. Formovací a jádrová směs byla pásem odvedena na síta, magnetické čištění a dále pomocí vzduchotechniky do chladících věží.

Dále byly hydraulickými nůžkami z odlitku odstriženy a vytaženy výztuhy z jader a byla oddělena vtoková soustava a nálitky.

- Tryskání odlitku - po vytlučení z formy následovalo tryskání odlitku v komorové tryskací kabině, kde byl odlitek umístěn na závěs a postupným otáčením došlo k jeho otryskání. Jako tryskací médium byla použita litinová drť o zrnitosti 1,5 až 2,5 mm.
- Apretace odlitku byla provedena s použitím ručního pneumatického náradí. Byly odbroušeny zářezy, dělicí roviny, popř. vzniklé zatekliny, případné připečeniny aj.
- Kontrola takto hmotných odlitků se provádí pouze vizuálně. Rozměry se kontrolují klasicky rýsováním, nebo pokud jsou k dispozici 3D data, za pomoci 3D scanu. Měří se tvrdost, a to pomocí Poldi kladívka. Po kontrole je odlitek uvolněn k expedici nebo k lakování.

3.2 Popis zařízení pro chemickou analýzu vzorků

Chemické analýzy vzorků prováděli v laboratoři Slévárny Kuřim, a.s. pracovníci laboratoře. Chemická analýza vzorků je běžný proces, který se provádí minimálně při každé tavně, modifikaci hořčíkem či legování. Ve výjimečných případech se provádí i analýza vzorků ze zkušebních tyčí, odlitků, nebo tzv. Y bloku. Ve Slévárně Kuřim se pro chemické rozborů využívá jiskrový optický spektrometr SPECTROMAXx a spalovací elementární analyzátor LECO pro prvky uhlík a síra.

3.2.1 Jiskrový optický spektrometr SPECTROMAXx

Jiskrový optický spektrometr SPECTROMAXx, který je zobrazen na Obr. 21, patří mezi optické emisní spektrometry (OES) s obloukovým a jiskrovým buzením, které probíhá v ochranné atmosféře argonu. [17] Spektrometr vyhodnocuje chemické složení ze vzorku (vzorek je často nazýván pečkou nebo penízkem), který je z jedné strany obroušen (viz Obr. 23), poté vložen mezi elektrody a „jiskřením“ vyhodnocen. Výsledky chemické analýzy se zobrazují a ukládají v PC a dále předávají do informačního systému slévárny.



Obrázek 23 – OES analyzátor SPECTROMAXx (nahore), zkušební vzorky na chem. analýzu (dole)

3.2.2 Spalovací elementární analyzátor LECO

Chemická analýza je prováděná na základě analýzy spalín, které vzniknou při spálení vzorku ve spalovacím kelímku v proudu kyslíku. Jednotlivé plynné složky jsou ve spalovacím reaktoru separovány za pomoci plynové chromatografie a následně detekovány vodivostním detektorem (TCD). [18] Spalovací elementární analyzátor se ve Slévárně Kuřim využívá k přesnému stanovení uhlíku a síry. Jako vzorek se využívá

část pecky, která je nadrcená na drobné částice o velikosti cca 1 až 3 mm a navážená spolu s wolframem (wolfram slouží jako tepelný katalyzátor). Následně se celková hmotnost připraveného vzorku vkládá do systému analyzátoru. Vzorek se přesype do spalovacího kelímku a vkládá do analyzátoru ke spálení.

3.2.3 Chemické složení taveniny v peci a v lící pánvi po modifikaci

Chemické složení pro jednotlivé odlitky je uvedeno v Tab. 4, 5 a 6 jak pro výchozí taveninu, tak pro taveninu po modifikaci plněným profilem.

Tabulka 4 – Chemické složení v peci a lící pánvi pro odlitek č. 1

prvek	C Pec	Si Pec	C Pánev	Si Pánev	Mn	S Pec	S Pánev	P	Cu	Sn	Cr	Mg	očkování
chem. složení [%]	3,81	1,34	3,69	2,16	0,16	0,018	0,011	0,04	0,02	0,013	0,04	0,051	20 m/t 0,55 %

Tabulka 5 – Chemické složení v peci a lící pánvi pro odlitek č. 2

prvek	C Pec	Si Pec	C Pánev	Si Pánev	Mn	S Pec	S Pánev	P	Cu	Sn	Cr	Mg	očkování
chem. složení [%]	3,92	1,30	3,74	2,30	0,12	0,021	0,012	0,04	0,02	0,011	0,04	0,059	20 m/t 0,55 %

Tabulka 6 – Chemické složení v peci a lící pánvi pro odlitek č. 3

prvek	C Pec	Si Pec	C Pánev	Si Pánev	Mn	S Pec	S Pánev	P	Cu	Sn	Cr	Mg	očkování
Chem. složení [%]	3,81	1,45	3,70	2,21	0,18	0,017	0,010	0,05	0,03	0,011	0,03	0,043	20 m/t 0,55 %

3.3 Popis zařízení pro mechanické zkoušky

Mechanické zkoušky probíhaly v mechanické laboratoři ve Slévárně Kuřim, a.s. Byly provedeny zkoušky tahem, zkoušky rázem v ohybu pomocí kladiva Charpy a zkouška tvrdosti dle Brinella.

3.3.1 Zkouška tahem

Ke stanovení základních mechanických hodnot, kterými jsou mez pevnosti v tahu R_m , smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ a tažnost A , bylo použito zkušební zařízení VEB Werkstoff Prüfmaschinen Leipzig ZD 30. Zařízení je zobrazeno na Obr. 24.

Vyhotovení zkušebních vzorků i samotné zkoušení bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 6892-1. [19]

3.3.2 Nárazová práce

Ke stanovení nárazové práce bylo použito Charpyho kladivo od výrobce VEB Werkstoff Prufmaschinen Leipzig viz Obr. 24. Vzorky byly odebrány z Y bloku. Z každého Y bloku byly vyrobeny tři vzorky, které se následně přerážely. K zařízení patří také chladicí jednotka, která dokáže vzorky podchladit až na teplotu $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zkoušení probíhalo dle ČSN EN ISO 148-1. [20]



Obrázek 24 – Zkušební zařízení pro tahovou zkoušku (vlevo) a Charpyho kladivo (vpravo)

3.3.3 Zkouška tvrdosti

Měření probíhalo na laboratorním tvrdoměru HPO280 dle metodiky uvedené v ČSN EN ISO 6506-1. [21]

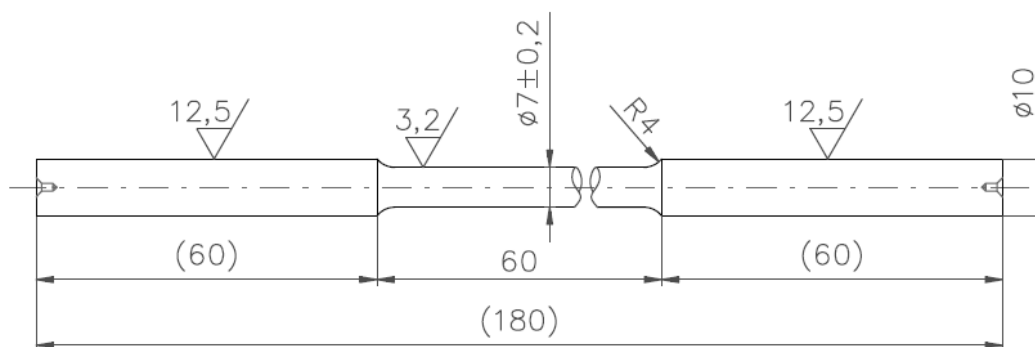
3.3.4 Vzorky pro mechanické zkoušky

Y blok, který se formuje společně s odlitkem, je po odlití a tryskání zobrazen na Obr. 23. Vyrobené vzorky z daného Y bloku, které jsou umístěné v chladicím

zařízení při zkoušce rázem v ohybu, vidíme na Obr. 25. Vzorky se z bloku frézují a následně brousí na drsnost povrchu Ra 0,8. Vzorky pro zkoušku tahem jsou odlévány separátně mimo formu odlitku. Po odlití zkušebních tyčí dochází k manuálnímu zasypání pískem pro pomalejší chladnutí. Tyče jsou dále soustruženy na rozměry, které jsou zobrazeny na Obr. 26.



Obrázek 25 – Y blok (nahore) a vzorky na zkoušku rázem v ohybu umístěné v mrazicím boxu (dole)



Obrázek 26 – Rozměry a tvar zkušební tyče pro zkoušku tahem [norma tah]

3.3.5 Vyhodnocení statické zkoušky tahem

Při statické zkoušce tahem byly zjištěny hodnoty meze kluzu, smluvní meze kluzu a tažnosti vždy pro dvě zkušební tyče náležící k odlitku 1, 2 a 3. Získané hodnoty

jsou uvedeny v Tab. 7. Zkoušení probíhalo při standardní teplotě 21 °C. Zkoušený materiál splňuje mechanické vlastnosti, které jsou požadovány po materiálu ČSN EN ISO GJS-400-18-LT.

Tabulka 7 – Výsledky statických zkoušek tahem

odlitek č.	vzorek č.	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [A]	A [%]
odlitek 1	zkušební tyč 1	425	290	19,5
	zkušební tyč 2	420	285	18,5
odlitek 2	zkušební tyč 1	420	290	19,0
	zkušební tyč 2	415	275	19,5
odlitek 3	zkušební tyč 1	405	265	21,5
	zkušební tyč 2	405	265	22,0

3.3.6 Vyhodnocení zkoušky rázem v ohybu

Výsledné hodnoty získané při přeražení zkušebních těles pomocí kladiva Charpy jsou uvedeny v Tab. 8. Získané hodnoty se sečtou a vydělí počtem hodnot. Výsledkem je hodnota KV, což v tomto případě značí potřebnou velikost nárazové práce pro přeražení zkušebních vzorků, které jsou podchlazeny na teplotu – 20 °C.

Tabulka 8 – Výsledky pro zkoušku rázem v ohybu

Odlitek č.	Označení vz.	KV _{vzorek} při -20 °C[J]	KV při -20 °C [J]
odlitek 1	vzorek 1	14,5	15
	vzorek 2	15,5	
	vzorek 3	15	
odlitek 2	vzorek 1	16,5	16
	vzorek 2	16,0	
	vzorek 3	15,5	
odlitek 3	vzorek 1	14	15
	vzorek 2	14	
	vzorek 3	16	

3.3.7 Vyhodnocení tvrdosti

Tvrdost měřená na vzorcích je v rozsahu od 139 do 145 HBW. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 9. Hodnoty odpovídají spodní hranici, kterou definuje norma pro materiál GJS-400-18-LT.

Tabulka 9 – Naměřené hodnoty tvrdostí

odlitek č.	vzorek č.	HBW
odlitek 1	vzorek 1	139
	vzorek 2	144
odlitek 2	vzorek 1	145
	vzorek 2	144
odlitek 3	vzorek 1	140
	vzorek 2	144

3.4 Metalografická analýza

Pro metalografickou analýzu byly vybrány vzorky z odlitku, zkušební tyče pro zkoušku tahem a Y-bloku. V01, V02 a V03 pro vzorek z odlitku. VT1, VT2 a VT3 pro vzorek zhotovený ze zkušební tyče a VY1, VY2 a VY3 pro vzorky z Y-bloku.

Vzorek z odlitku musel být vyřezán, zmenšen a následně frézován. Jako vzorek z odlitku slouží technologická výztuha uvnitř převodové skříně, která brání deformacím při tuhnutí. Místo odebrání vzorku je co nejblíže stěně odlitku. Vzorky ze zkušebních tyčí, které byly přetrženy, nebyly dále upravovány žádným obráběním. Vzorky z Y-bloku byly frézovány a řezány.

3.4.1 Příprava vzorků na vyhodnocení

Metalografické vzorky se brousí na dvoukotoučové brusce Herzog HT350-2 viz Obr. 27, a to postupně při použití brusných papírů se zrnitostí 40 μm , 150 μm , 320 μm , 600 μm , 800 μm a 1000 μm po dobu 1 až 3 minut pro každý brusný papír. Vzorky se brousí vždy kolmo na předešlé broušení. Finální úprava leštěním probíhá na leštičce MLJ za pomoci brousící pasty na bázi kysličníku chromitého s vodou po dobu 5 minut. Vzorky se opláchnou lihem, vysuší a leptají Nitalem po dobu 15 až 20 vteřin. Následuje oplach lihem a vysušení.



Obrázek 27 – Dvoukotoučová bruska Herzog HT350-2

3.4.2 Vyhodnocení vzorků

K vyhodnocení vzorků byl použit optický mikroskop Neophot 21. K mikroskopu je připojený digitální fotoaparát CANON EOS 1000D, který je dále připojen k PC, kde se zobrazují pořízené snímky metalografických vzorků. Snímání vzorků bylo provedeno dle doporučení, které je uvedeno v normě ČSN EN ISO 945-1, a to při zvětšení vzorku 100x.

Dle postupů uvedených v [22] byla pozorována velikost a tvar grafitu, počet kuliček grafitu na danou plochu a dále stav grafitu (dokonale, nedokonale zrnitý a explodovaný grafit). Po naleptání 4% Nitalem bylo posuzováno množství feritu a perlitu v matrici.

3.4.3 Metodika vyhodnocení

Metodika vyhodnocení metalografických vzorků je identická s normou ČSN EN ISO 945 - Mikrostruktura litin - Část 1: Klasifikace grafitu vizuální analýzou.

3.4.4 Vyhodnocení metalografických struktur vzorků

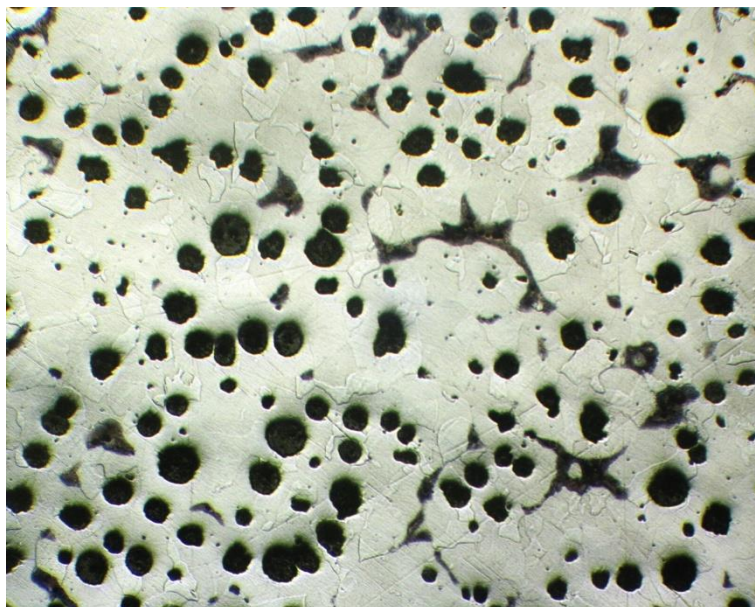
Tabulka 10 – Vyhodnocení metalografických vzorků

název odlitku	odlitek 1			odlitek 2			odlitek 3		
místo odběru vzorku	VO1	VT1	VY1	VO2	VT2	VY2	VO3	VT3	VY1
počet kuliček grafitu	137	47	120	155	77	126	155	79	114

dokonale zrnitý grafit [%]	49	50	51	57	39	48	54	37	47
nedokonale zrnitý grafit [%]	50	50	49	41	61	52	45	62	53
červíčkový grafit [%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0
explodovaný grafit [%]	1	0	0	2	0	0	1	1	0
podíl feritu [%]	95	88	95	92	92	95	92	92	95
podíl perlitu [%]	5	12	5	8	8	5	8	8	5

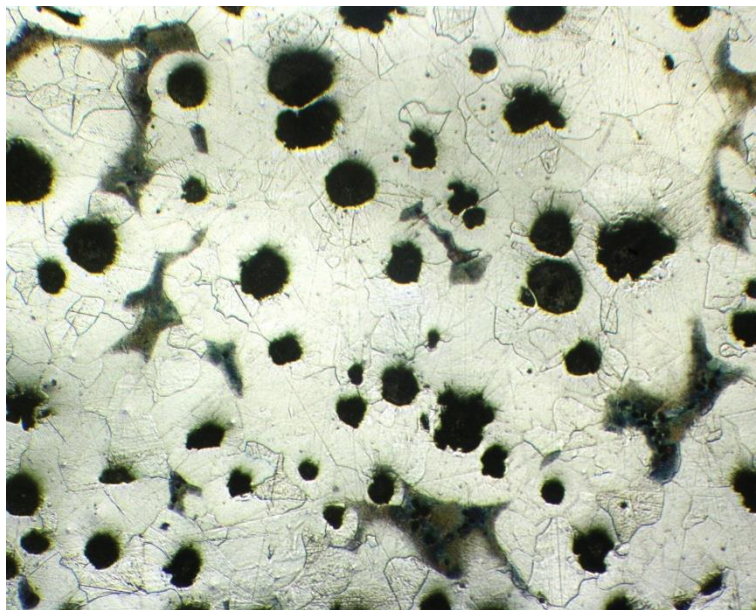
3.4.4.1 Metalografické vzorky z odlitku 1

Na Obr. 28 je zobrazen vzorek odebraný z odlitku (VO1). Struktura je feritická, rozložení grafitu je relativně rovnoměrné, ale liší se jeho velikost. Podíl dokonale zrnitého grafitu je 49 %.

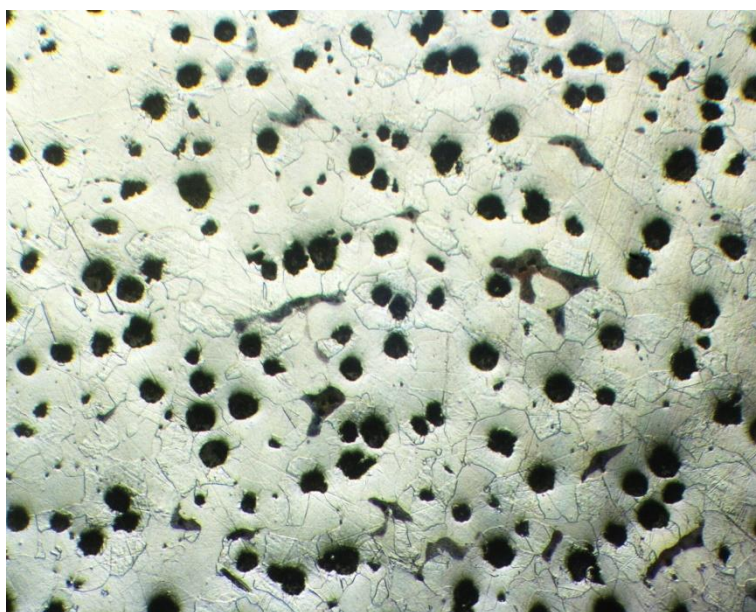


Obrázek 28 – Vzorek z odlitku 1 (VO1), zvětšeno 100x, leptáno 4% Nital

Vzorek (VT1), který je zobrazen na Obr. 29 a který je vyhotovený ze zkušební tyče pro zkoušku tahem, obsahuje téměř identický podíl dokonale zrnitého grafitu jako vzorek VO1, ale výrazně se liší počet kuliček grafitu na mm^2 . Podíl perlitu dosahuje 12 % a zejména velikost samotných kuliček grafitu je téměř dvojnásobná. Na Obr. 30 je zobrazen vzorek z Y bloku odlitku 1 (VY1), který strukturou, rozložením a velikostí grafitu odpovídá odlitku. Rozdíl je pouze v počtu kuliček grafitu na mm^2 .



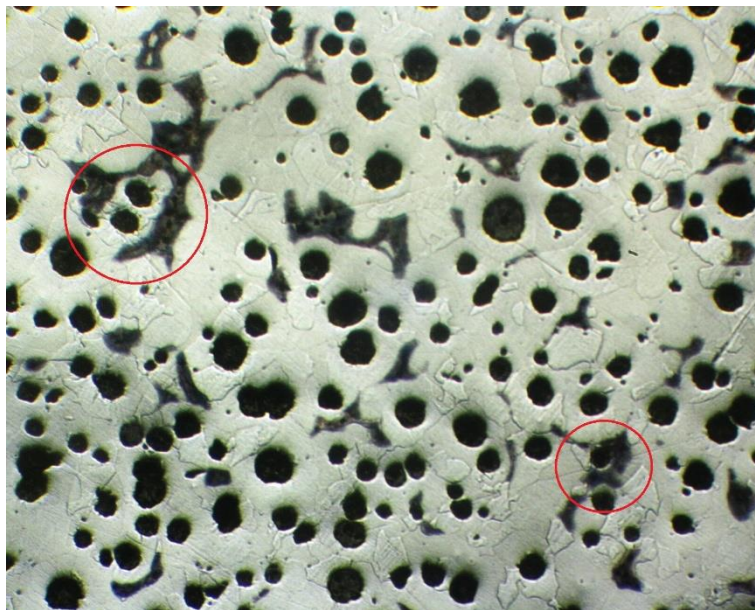
Obrázek 29 – Vzorek ze zkušební tyče (VT1) odlitku 1, zvětšeno 100x, leptáno 4 % Nital



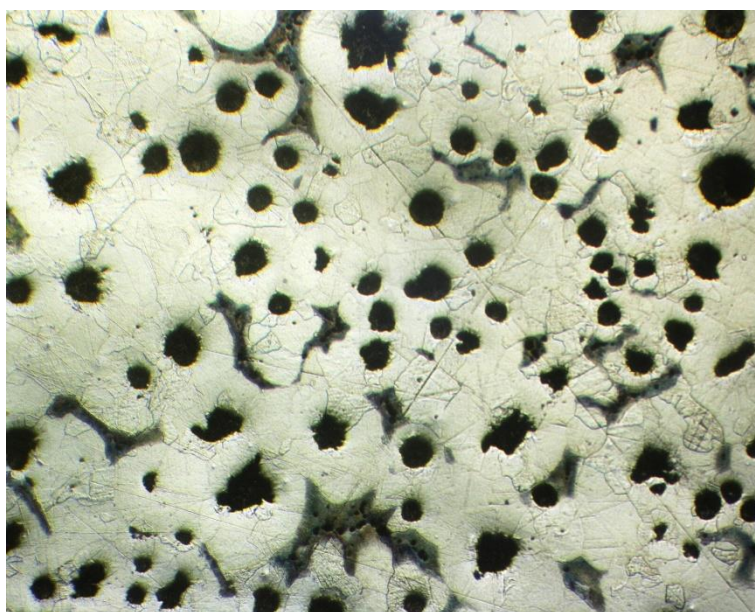
Obrázek 30 – Vzorek z Y bloku (VY1) odlitku 1, zvětšeno 100x, leptáno 4 % Nital

3.4.4.2 Metalografické vzorky z odlitku 2

Vzorky z odlitku vykazují stejný trend rozložení a procentuální zastoupení dokonale zrnitého grafitu jako vzorky z odlitku 1. Rozdílný je ovšem výskyt tzv. feritických dvorců kolem kuliček grafitu (označeny na Obr. 31 červeně). Ferit je zastoupen 92%, perlit 8%.

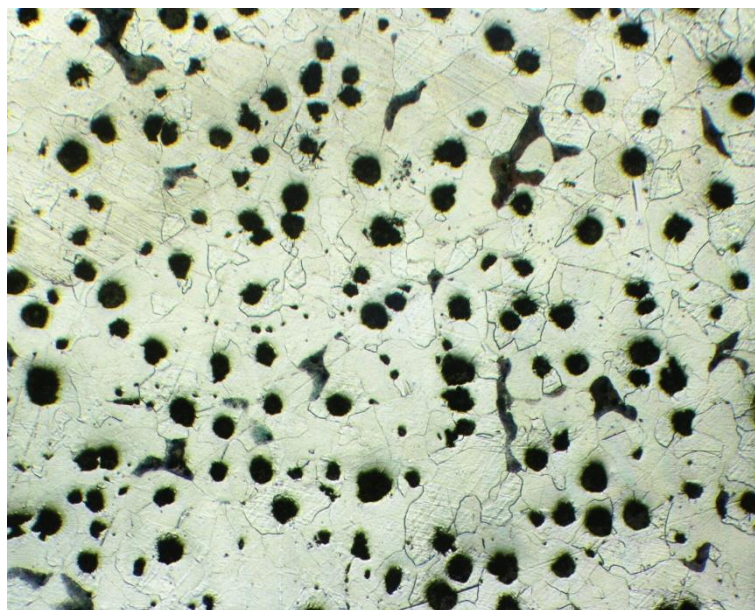


Obrázek 31 – Vzorek z odlitku 2 (V02), červeně vyznačeny feritické dvorce, zvětšeno 100x, leptáno 4 % Nital



Obrázek 32 – Vzorek ze zkušební tyče (VT2), zvětšeno 100x, leptáno 4 % Nital

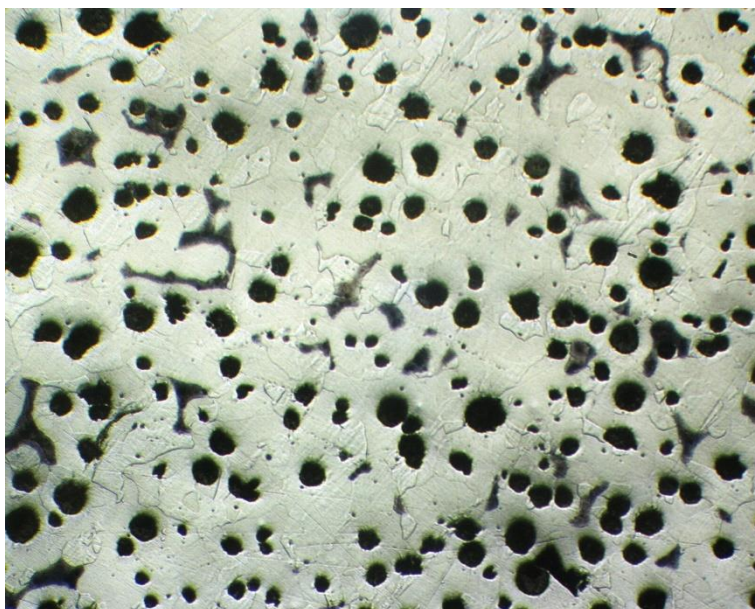
Vzorek z odlitku 2, odebraný z Y bloku (VY2) viz Obr. 33, vykazuje pravidelné rozložení grafitu. Velikost grafitu je téměř identická v celé ploše metalografického výbrusu. Vzorek nevykazuje žádné feritické dvorce, které se vyskytují na vzorku přímo z odlitku a na vzorku vyhotoveného ze zkušební tyče pro zkoušku tahem.



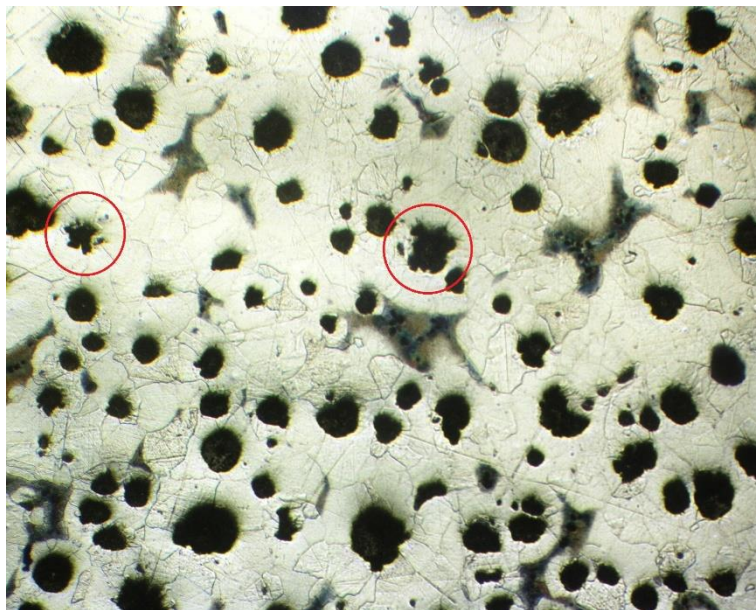
Obrázek 33 – Vzorek z Y bloku (VY2), zvětšeno 100x, leptáno 4 % Nital

3.4.4.3 Metalografické vzorky z odlitku 3

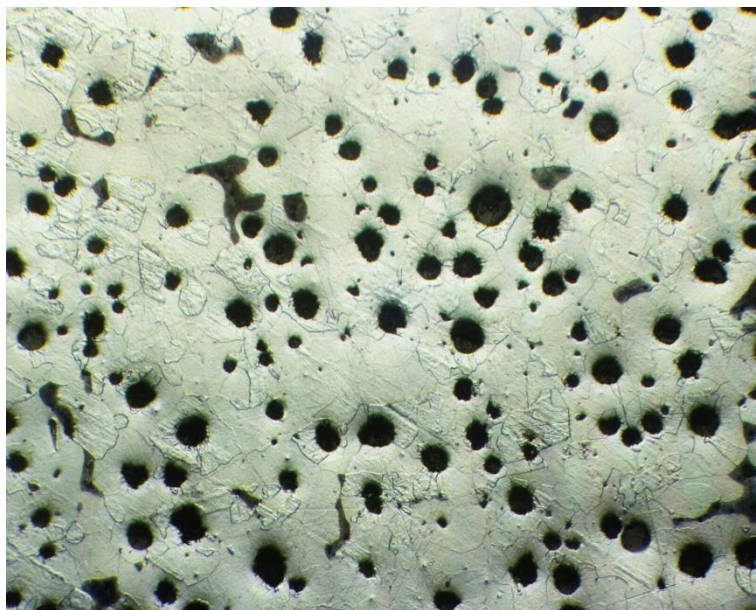
Vzorky z odlitku 3 vykazují obecně menší velikost grafitových kuliček. U vzorku z odlitku VO3 viz Obr. 34, je ideálně rozložený kuličkový grafit. Vzorek ze zkušební tyče pro zkoušku tahem (VT3), který je zobrazen na Obr. 35 obsahuje opět méně kuliček grafitu než vzorky z odlitku a Y bloku, ale také se liší jejich velikost. Pro ilustraci je na daném vzorku zvýrazněn rozpadnutý grafit.



Obrázek 34 – Vzorek z odlitku 3 (VO3), zvětšeno 100x, leptáno 4 % Nital



Obrázek 35 – Vzorek ze zkušební tyče (VT3), červeně rozpadnutý grafit, zvětšeno 100x, leptáno 4 % Nital



Obrázek 36 – Vzorek z Y bloku (VY3), zvětšeno 100x, leptáno 4 % Nital

3.5 Statistické vyhodnocení a analýza vad na odlitcích těžších než 750 kg

Každý odlitek vykazuje určité vady. Vady se rozdělují na přípustné a nepřípustné. Přípustné vady zpravidla neomezují funkčnost odlitku nebo při dalším zpracování odlitku (obrábění) zmizí. Příklad takové vady je třeba nárůst odlitku v dělicí rovině, kde dojde k nedodržení některých rozměrů, ale jediným důsledkem této vady je, že dojde k navýšení přídaveků na obrábění nebo výskyt tzv. bodlin. Bodliny se vyskytují nejčastěji na vršku odlitku a mají ve většině případů charakter drobných prohlubní do hloubky maximálně 5 mm. V případě, že přídavek na obrábění

je dostatečný, bodliny obráběním zmizí (tato úvaha je vztažená k hmotným odlitkům, kde se přídavky na obrábění volí velké). Je to dáno také tím, že velké a hmotné odlitky bývají odlévány dle rozměrových a geometrických tolerancí (zdroj 8062-3), které se řídí normou ČSN EN ISO 8062-3 a stupněm přesnosti nejčastěji DCTG 11. Mezi vady přípustné patří také vady opravitelné. Oprava vad na odlitku musí být zpravidla schválena zákazníkem. Nejčastěji se jedná o opravu svařováním nebo tmelením.

Vady nepřípustné jsou takové vady, které zákazník neakceptuje. Omezují funkčnost a bezpečnost odlitku anebo odlitek vylučují po estetické stránce.

3.5.1 Metodika výběru dat

Slévárny pracují s interními informačními systémy, které obsahují mimo sestav k plánování výroby, řízení výroby, skladování či materiálovým hospodářstvím aj. i sestavy zabývající se kvalitou a řízením neshodné výroby.

Sestavy neshodné výroby obsahují filtry dat, která nám pomáhají k získání požadovaných informací. Základní nastavení filtrů je dle vad, hmotnosti odlitků, časového období, zda jde o interní nebo externí neshodnou výrobu, materiálové rozdělení, rozdělení dle zákazníků nebo rozdělení dle střediska či útvaru vzniku neshodného odlitku – viníka.

Výběr dat pro vyhodnocení experimentu byl stanoven na odlitky s hmotností větší než 750 kg ze všech odlévaných odlitků z litiny s kuličkovým grafitem. Součet odlitků obsahuje interní i externí neshodnou výrobu. Do vyhodnocení jsou zahrnuty i odlitky s opravitelnými vadami a dále je výběr omezen na 8 nejčastějších vad dle četnosti výskytu. Vady, které nejsou zmíněny, jsou uvažovány jako vady ostatní.

3.5.2 Přehled nejčastěji vyskytujících se vad

Tabulka 11 – přehled nejčastěji vyskytujících se vad u odlitků z hmotností nad 750 kg z LKG

Počet neshodných odlitků [ks]	Název vady	Číslo vady dle [23]
77	Povrchové připečeniny	212
55	Zadrogeniny	521
34	Rozplavený písek	522
25	Otevřené staženiny	441
18	Zavaleniny	341
16	Odvařeniny od formy či jádra	231

10	Povrchové trhliny	311
8	Odchyly hodnot mech. vlastností	720
33	Ostatní vady	-

4 SHRnutí A DISKUZE VÝSLEDKŮ

Výsledky obsažené v této diplomové práci přináší dílčí informace o možných potížích, které mohou nastat při výrobě hmotných odlitků z litiny s kuličkovým grafitem. Výroba hmotných odlitků je spojena s několika faktory, které ovlivňují kvalitu vyrobených odlitků.

- 1) Pro studium mechanismu vzniku kuličkového grafitu a tuhnutí litiny s kuličkovým grafitem je možno v praxi obvykle použít dvě významné pomůcky. První pomůckou je sledování křivky tuhnutí a chladnutí litiny s kuličkovým grafitem, druhou pomůckou je metalografické hodnocení struktury vyrobené litiny. Druhá pomůcka byla aplikována při řešení mé diplomové práce. Další pomůckou je např. sledování chemického složení materiálu odlitku s ohledem na množství modifikačního činidla, kterým může být např. hořčík nebo cín. Tvorbu kuličkového grafitu mimo standardního železa, uhlíku, křemíku a nízkého obsahu síry cca do 0,009 %, ovlivňuje také množství kyslíku obsaženého v tavenině. Proces modifikace snižuje obsah kyslíku z přibližně 100 ppm na 30 ppm. Proces očkovaní mimo jiné eliminuje i karbidotvornost modifikačního činidla.
- 2) Kvalitní výroba hmotných odlitků z litiny s kuličkovým grafitem je ovlivněna velikostí dutiny slévárenské pískové formy a množstvím, resp. dosažením homogenity chemického složení modifikované a očkované taveniny.
- 3) Hodnocení metalografických a mechanických vzorků, které se provádí pro vlastní kontrolu i jako výstup pro zákazníka o jakosti dodaného materiálu z kterého je odlitek vyroben, je proces přibližný a zkušební. Na základě metalografických výbrusů se potvrdilo nepsané pravidlo, že vzorky odebrané přímo z odlitku nebo z Y bloku vykazují lepší rozložení a velikost grafitu než vzorky ze zkušebních tyčí pro statickou zkoušku tahem odlévaných mimo formu odlitku.
- 4) Při statické zkoušce tahem vzorky ze zkušební tyče odlitku č. 1 dosáhly nejnižší tažnosti. Důvodem byl vyšší obsah perlitu 12 %, než u zbylých zkušebních tyčí odlitků č. 2 a 3, kde perlitická struktura byla zastoupena shodně 8 %. Mez pevnosti byla také mírně vyšší než u vzorků s odlitků č. 2 a 3.
- 5) Statistické vyhodnocení zastoupení nejčastějších vad u odlitků z litiny s kuličkovým grafitem a s hmotností vyšší než 750 kg Potvrzuje předpoklad,

že vysoká kvalita a homogenita formovací směsi je určující bodem pro snížení neshodné výroby, snížení prací, které vzniknou opravou daných vad a pro celkové zlepšení povrchu odlitku.

Tabulka 12 – Procentuální zastoupení nejčastějších vad

Počet neshodných odlitků [ks]	Název vady	Číslo vady dle [23]	Zastoupení v [%]
77	Povrchové připečeniny	212	28
55	Zadrogeniny	521	20
34	Rozplavený písek	522	12
25	Otevřené staženiny	441	9
18	Zavaleniny	341	6
16	Odvařeniny od formy či jádra	231	6
10	Povrchové trhliny	311	4
8	Odchylky hodnot mech. vl.	720	3
33	Ostatní vady	-	12

- 6) Dutina pískové formy pro výrobu hmotných odlitků se zaplňuje taveninou pomaleji a současně dlouho dobu trvá tuhnutí odlitku v této pískové formě. Písková forma, díky své nižší hodnotě součinitele tepelné akumulace (b_F), se prohřívá na svém líci. Je zde nebezpečí vzniku reakcí formy a roztaveného kovu. V případě velké výšky odlitku h se ustavuje ve spodní části slévárenské formy vysoká hodnota hydrostatického (slévárensky – metalostatického) tlaku $p_h = h \cdot \rho \cdot g$ [Pa], při dosazení hodnot příslušných veličin v soustavě SI. Vlivem vysokého hydrostatického tlaku obvykle proniká tavenina mezi zrna ostřiva a na povrchu odlitku vznikají připečeniny mechanického charakteru. Současně v důsledku značného ohřátí líce slévárenské formy po nalití taveniny do dutiny formy dochází obvykle k vývinu plynů. Děje se tak vlivem odpařování volné vody, která je uložena v pórech formy (sloužila jako plastifikační činidlo pro lepší formovatelnost), uvolňováním krystalické vody a rozkladem některých minerálů, které jsou přimíseny v ostřivu. Dále také destilací látek nebo hořením organických látek obsažených ve formě. V důsledku ještě malého prohřátí slévárenské formy se takto vzniklé plyny uvolňují v blízkosti líce formy a

vzrůstá nebezpečí, že budou odtlačovat taveninu od jejího líce. Tím budou na povrchu odlitku vznikat vady, tzv. odvařeniny.

- 7) Velké množství odlévané taveniny, které protéká kanály vtokové soustavy, může erozivně působit na slévárenskou formu, která vykazuje určitou pevnost i s ohledem na její prodyšnost. Tím mohou v odlitku vznikat vady, tzv. zadrobeniny. Za vznikem zadrobenin nemusí být vždy pouze erozivní působení taveniny, ale také lidský faktor (chyba při zakládání jader do formy, špatně vyfoukaná forma před a po skládání aj.). Přesná příčina zadrobenin se v některých případech dá pouze odhadovat.
- 8) Zastoupení otevřených staženin a zavalenin spolu v některých případech souvisí. Odlitky z kuličkového grafitu se nálitkují pomocí exotermických nálitků. Velikost nálitků se vypočítává. Pokud dojde k chybě ve výpočtu a tavenina v nálitku začne chladnout rychleji, než odlitek, tak pod krčkem nálitku vznikne otevřená staženina. Dalším možným příkladem vzniku otevřené staženiny je nízká lící teplota kovu, což máš za následek nenaplnění celého objemu nálitku taveninou a ta následně chybí pro doplnění do odlitku. Zavaleniny vznikají také při nízké lící teplotě a proto tyto dvě vady bývají na hmotných odlitcích zastoupeny současně.
- 9) Povrchové trhliny vznikají spíše na rozměrných odlitcích, při tuhnutí odlitku, kdy je pevnost a tažnost daného materiálu ještě nízká. Nejčastějším důvodem výskytu trhlín je odpor jádra proti smrštění odlitku. Částečným řešením, které minimalizuje vznik trhlín, je vyhotovení velkých rádiusů v tepelných uzlových bodech odlitku.

5 ZÁVĚR

Diplomová práce byla vypracována na téma: „Výroba hmotných odlitků z litiny s kuličkovým grafitem“ a je rozdělena na část teoretickou a část experimentální.

Teoretická část obsahuje přehled litin, grafitických litin a jejich základní rozdělení. Rozebrán je vznik kuličkového grafitu, způsob výroby taveniny v indukčních pecích pro výrobu litiny s kuličkovým grafitem a způsoby modifikace a zařízení k tomu používané. Dále je zde také uveden přehled modifikačních činidel a základních tepelných zpracování, které se využívá u litin s kuličkovým grafitem. Pro výrobu hmotných odlitků se používají formovací směsi na bázi furanu, proto jsou zmíněny pouze tyto směsi. Vady, které se dle mé zkušenosti na odlitcích z litiny s kuličkovým grafitem vyskytují nejčastěji, jsou rozepsány a je vysvětlen základní mechanismus jejich vzniku.

Experimentální část byla zaměřena na sledování vnitřní struktury hmotných odlitků z litiny s kuličkovým grafitem. V rámci tohoto záměru bylo provedeno metalografické sledování struktury této litiny. Byl proveden odběr a příprava zkušebních vzorků pro metalografickou analýzu, statickou zkoušku tahem, měření tvrdosti a pro zkoušku rázem v ohybu. Porovnáváním získaných hodnot z jednotlivých zkoušek, pro tři identické odlitky odlévaných z různých taveb s mírně odlišným chemickým složením, byly hledány souvislosti a provázanost jednotlivých zkoušek. Vyhodnocení vad u odlitků ukázalo rozdíly oproti předpokládané četnosti výskytu některých vad.

Detailní výsledky jsou uvedeny v příslušných kapitolách experimentální části a v části diplomové práce věnované shrnutí a diskuzi výsledků. Při metalografické analýze vzorů se však potvrdil předpoklad, že zkušební vzorky (zejména metalografické vzorky ze zkušebních tyčí pro zkoušku tahem) obsahují menší počet grafitových kuliček a jejich velikost je v porovnání se vzorky z odlitku a Y bloku větší. Obsah perlitu, který je obsažen ve struktuře vzorku zkušební tyče odlitku č. 1 (ač je proti ostatním vzorkům zastoupení perlitu větší pouze o 4 %), má vliv na zkoušku tahem, když mez pevnosti R_m byla vyšší než u ostatních vzorků.

Statistické vyhodnocení vad ukázalo, že největší vliv na kvalitu výroby hmotných odlitků z litiny s kuličkovým grafitem má dobře připravená, upěchovaná a na líci kvalitně žáruvzdorným nátěrem ošetřená formovací směs. Ostatní vady jsou již

více spojeny s vlastním návrhem technologie, tvarovou složitostí odlitku, ale také lidským faktorem a dodržováním předepsaných technologických postupů.

Neboť byly sledovány především technologické parametry výroby a podařilo se vyrobit zatím pouze menší množství odlitků, nebylo provedeno ekonomické hodnocení výroby těchto odlitků. Lze však předpokládat, že zpřesnění technologických parametrů výroby a dodržování všech technických předpisů a postupů při výrobě odlitků z litiny s kuličkovým grafitem, bude vést k úsporám surovin i energie, ale také ke snížení výskytu neshodné výroby.

6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie litin*. Brno: PC-DIR, 1998. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1263-1.
- [2] MINKOFF, I. *The Physical Metallurgy of Cast Iron*. USA - California: John Wiley, 1983. ISBN 978-0471900061.
- [3] ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE, ed. *ASM Handbook: Volume 15 - Casting*. Materials Park ASM: ASM International, 2010. ISBN 0-87170-021-2.
- [4] NOVÁ, Iva. *Teorie slévání*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-185-5.
- [5] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie litin* [online]. Ostrava, 2014 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <http://www.fsiforum.cz/upload/soubory/databaze-predmetu/CME/Metalurgie%20litin.pdf>
- [6] ČSN EN 1560:2011 - *Slévárenství - Systém označování litiny - Značky materiálů a číselné označování materiálů*. CEN, 2011.
- [7] HAMPL, Jiří. *Metalurgie slévárenských slitin: studijní opora*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3585-3.
- [8] SNAM - Slévárenské suroviny. *METOS* [online]. Chrudim [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: <https://www.metos.cz/snam.html>
- [9] OTÁHAL, Vlastislav. *Tvárná litina: Litina s kuličkovým grafitem* [online]. 2. rozšířené vydání. Brno: Technicko-ekonomické poradenství, 2008 [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: http://otahalconsult.cz/wp-content/pdf/TVL-II_vytah.pdf
- [10] SNAM - Slévárenské suroviny. *METOS* [online]. Chrudim [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://www.metos.cz/snam.html>
- [11] +GF+ Manufacturing Technologies [online]. *GFCS International* [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://www.gfcs.com/en/technology-space/technologies.html>
- [12] ČSN 42 1221: *Slévárenské surové železo: Technické dodací předpisy*. ČR: ÚNMZ, 1972.
- [13] MACHUTA, Jiří a Iva NOVÁ. *Slévárenské formy*. V Liberci: Technická univerzita, 2014. ISBN 978-80-7494-083-5.
- [14] BEŇO, Jaroslav, Petr JELÍNEK a Nikol ŠPIRUTOVÁ. *Slévárenské směsi*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2015.

- [15] ROWLEY, Mervin T., ed. *International Atlas of Casting Defects*. USA: ASM International & American Foundry Society, 2007. ISBN 978-0874330533.
- [16] ELBEL, Tomáš. *Diagnostika a řízení kvality odlitků: studijní opora*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3584-6.
- [17] SPECTROMAXx Metal Analyzer. *Spectro* [online]. Germany: SPECTRO Analytical Instruments, 2020 [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: <https://www.spectro.com/products/optical-emission-spectroscopy/spectromaxx-metal-analyzer>
- [18] Modulární elementární spalovací analyzátor. *Labtech* [online]. Brno: LABTECH, 2017 [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: <https://www.labtech.eu/modularni-elementarni-spalovaci-analyzator-ea3000.html>
- [19] ČSN EN ISO 6892-1: *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. 2010.
- [20] ČSN EN ISO 148-1: *Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy - Část 1: Zkušební metoda*. 2017.
- [21] ČSN EN ISO 6506-1: *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Brinella - Část 1: Zkušební metoda*. 2015.
- [22] ČSN EN ISO 945-1: *Mikrostruktura litin - Část 1: Klasifikace grafitu vizuální analýzou*. 2011.
- [23] VADY ODLITKŮ. Soubor článků vydaných časopisem *Slévárenství* na CD ROM. Redakce časopisu *Slévárenství*, Brno, 1997.